

Н. В. Чернобровов

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

**ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ**

**Допущено Министерством
энергетики и электрификации СССР
в качестве учебного пособия
для учащихся энергетических
и энергостроительных техникумов**



«ЭНЕРГИЯ» МОСКВА 1974

6П2.11

Ч-49

УДК 621.316.925 (075)

Чернобровов Н. В.

Ч-49 Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974.

680 с. с пл.

В книге рассмотрена релейная защита электрических сетей, оборудования электростанций и сборных шин распределительных устройств. Четвертое издание книги вышло в 1971 г.

Книга предназначена в качестве учебного пособия для учащихся энергетических техникумов и может быть использована студентами электротехнических и энергетических вузов, а также инженерами и техниками, занимающимися эксплуатацией, монтажом и проектированием релейной защиты электростанций и сетей.

Ч $\frac{30311-601}{051(01)-74}$ 75-74

6П2.11

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЯТОМУ ИЗДАНИЮ

Релейная защита осуществляет автоматическую ликвидацию повреждений и ненормальных режимов в электрической части энергосистем и является важнейшей автоматикой, обеспечивающей их надежную и устойчивую работу.

В современных энергетических системах значение релейной защиты особенно возрастает в связи с бурным ростом мощности энергосистем, объединением их в единые электрически связанные системы в пределах нескольких областей, всей страны, и даже нескольких государств.

Характерным для современных энергосистем является развитие сетей высокого и сверхвысокого напряжения, с помощью которых производится объединение энергетических систем и передача больших потоков электрической энергии от мощных электростанций к крупным центрам потребления.

В Советском Союзе на базе сетей 500 кВ создается Единая энергетическая система страны (ЕЭС), сооружаются мощные и протяженные передачи 500—750 кВ, а в недалеком будущем предполагается создание еще более мощных передач 1150 кВ переменного и 1500 кВ постоянного тока, строятся крупнейшие тепловые, гидравлические и атомные электростанции, увеличивается мощность энергетических блоков. Соответственно растет мощность электрических подстанций, усложняется конфигурация электрических сетей и повышается их нагрузка.

Рост нагрузок, увеличение протяженности линий электропередачи, ужесточение требований к устойчивости энергосистем осложняют условия работы релейной защиты и повышают требования к ее быстродействию, чувствительности и надежности. В связи с этим идет непрерывный процесс развития и совершенствования техники релейной защиты, направленный на создание все более совершенных защит, отвечающих требованиям современной энергетики.

Создаются и вводятся в эксплуатацию новые защиты для дальних электропередач сверхвысокого напряжения, для крупных генераторов, трансформаторов и энергетических блоков. Разрабатываются дистанционные защиты со сложными характеристиками, позволяющими получить оптимальное решение очень

сложной задачи — надежной отстройки защиты от нагрузки и качаний при сохранении достаточной чувствительности при коротких замыканиях. Ищутся пути усовершенствования блокировок от качаний и от повреждений в цепях напряжения. Совершенствуются способы резервирования отказа защит и выключателей. Все более определенной становится тенденция отказа от электромеханических реле и переход на статические, бесконтактные системы.

Широкое распространение в связи с этим получает применение в устройствах релейной защиты полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов, тиристоров). Разрабатываются конструкции реле на магнитных элементах. Предпринимаются попытки использования контактных реле, более надежных, чем обычные электромеханические конструкции. К числу таких реле относятся герметичные магнитоуправляемые контакты (герконы), представляющие собой безъякорные реле (применяемые в вычислительной технике). Они отличаются большим быстродействием, надежностью и малыми размерами. Рассматривается возможность использования ЭЦВМ для выполнения функций релейной защиты.

Все более необходимым становится использование ЭЦВМ для расчета уставок защиты, поскольку такие расчеты в современных энергосистемах очень трудоемки и занимают много времени.

В связи с ростом токов короткого замыкания, вызванным увеличением генераторной мощности энергосистем, актуально значение приобретают вопросы точности трансформации первичных токов, питающих измерительные органы релейной защиты. Для решения этой проблемы ведутся исследования поведения трансформаторов тока, изучаются возможности повышения их точности, разрабатываются пригодные для практики методы расчета погрешностей трансформаторов тока, ищутся новые более точные способы трансформации первичных токов.

При подготовке к переизданию книги автор стремился отразить новые разработки отечественной техники по перечисленным выше направлениям ее развития. В книгу вошли новые защиты и технические решения, уже нашедшие применение на практике или имеющие реальную перспективу применения. С учетом этого внесены изменения и дополнения в третью главу, посвященную трансформаторам тока, в главу пятнадцатую, излагающую принципы защиты генераторов, и в главу семнадцатую, касающуюся защиты блоков. В остальные главы внесены изменения и уточнения, направленные главным образом на улучшение изложения.

Автор приносит благодарность рецензенту книги Т. Н. Дородновой за ряд полезных замечаний. Все пожелания и замечания автор просит направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая набережная, 10, Издательство «Энергия».

Автор

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

1-1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

В энергетических системах могут возникать повреждения и ненормальные режимы работы электрооборудования электростанций и подстанций, их распределительных устройств, линий электропередачи и электроустановок потребителей электрической энергии.

Повреждения в большинстве случаев сопровождаются значительным увеличением тока и глубоким понижением напряжения в элементах энергосистемы.

Повышенный ток выделяет большое количество тепла, вызывающее разрушения в месте повреждения и опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования, по которым этот ток проходит.

Понижение напряжения нарушает нормальную работу потребителей электроэнергии и устойчивость параллельной работы генераторов и энергосистемы в целом.

Ненормальные режимы обычно приводят к отклонению величин напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении частоты и напряжения создается опасность нарушения нормальной работы потребителей и устойчивости энергосистемы, а повышение напряжения и тока угрожает повреждением оборудования и линий электропередачи.

Таким образом, *повреждения нарушают работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, а ненормальные режимы создают возможность возникновения повреждений или расстройств работы энергосистемы.*

Для обеспечения нормальной работы энергетической системы и потребителей электроэнергии необходимо возможно быстрее выявлять и отделять место повреждения от неповрежденной сети, восстанавливая таким путем нормальные условия их работы и прекращая разрушения в месте повреждения.

Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонение от нормального режима и принять меры к его устранению (например,

спизить ток при его возрастании, понизить напряжение при его увеличении и т. д.).

В связи с этим возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции и защищающих систему и ее элементы от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

Первоначально в качестве подобной защиты применялись плавкие предохранители. Однако по мере роста мощности и напряжения электрических установок и усложнения их схем коммутации такой способ защиты стал недостаточным, в силу чего были созданы защитные устройства, выполняемые при помощи специальных автоматов — реле, получившие название релейной защиты.

Релейная защита является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных энергетических систем. Она осуществляет непрерывный контроль за состоянием и режимом работы всех элементов энергосистемы и реагирует на возникновение повреждений и ненормальных режимов.

При возникновении повреждений защита выявляет и отключает от системы поврежденный участок, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания токов повреждения.

При возникновении ненормальных режимов защита выявляет их и в зависимости от характера нарушения производит операции, необходимые для восстановления нормального режима, или подает сигнал дежурному персоналу.

В современных электрических системах релейная защита тесно связана с электрической автоматикой, предназначенной для быстрого автоматического восстановления нормального режима и питания потребителей.

К основным устройствам такой автоматики относятся: автоматы повторного включения (АПВ), автоматы включения резервных источников питания и оборудования (АВР) и автоматы частотной разгрузки (АЧР).

Рассмотрим более подробно основные виды повреждений и ненормальных режимов, возникающих в электрических установках, и их последствия.

1-2. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Большинство повреждений в электрических системах приводит к коротким замыканиям фаз между собой или на землю (рис. 1-1). В обмотках электрических машин и трансформаторов, кроме коротких замыканий бывают замыкания между витками одной фазы.

Основными причинами повреждений являются:

1) нарушение изоляции токоведущих частей, вызванное ее старением, неудовлетворительным состоянием, перенапряжениями, механическими повреждениями;

2) повреждение проводов и опор линий электропередач, вызванное их неудовлетворительным состоянием, гололедом, ураганным ветром, плаской проводов и другими причинами;

3) ошибки персонала при операциях (отключение разъединителей под нагрузкой, включение их на ошибочно оставленное заземление и т. д.).

Все повреждения являются следствием конструктивных недостатков или несовершенства оборудования, некачественного его

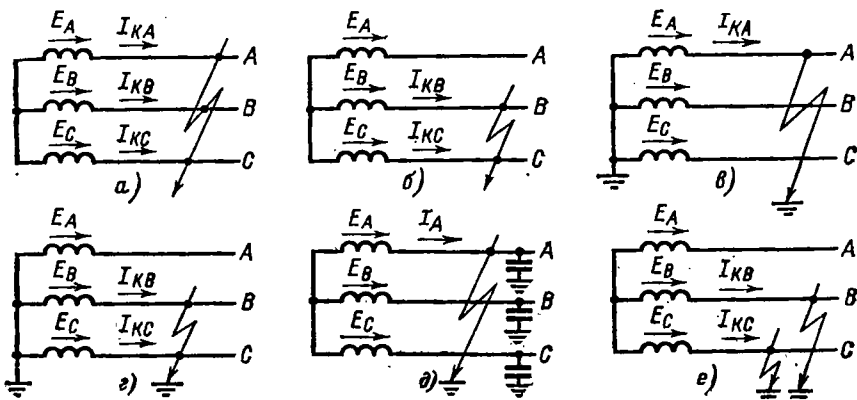


Рис. 1-1. Виды повреждений в электрических установках.

а, б, в и г — трехфазное, двухфазное, однофазное и двухфазное на землю к. з.; д и е — замыкания одной фазы и двух фаз на землю в сети с изолированной нейтралью.

изготовления, дефектов монтажа, ошибок при проектировании, неудовлетворительного или неправильного ухода за оборудованием, ненормальных режимов работы оборудования, работы оборудования в условиях, на которые оно не рассчитано. Поэтому повреждения нельзя считать неизбежными, но в то же время нельзя и не учитывать возможность их возникновения.

Короткие замыкания (к. з.) являются наиболее опасным и тяжелым видом повреждения. При к. з. э. д. с. E источника питания (генератора) замыкается «накоротко» через относительно малое сопротивление генераторов, трансформаторов и линий (см. рис. 1-1, а — г и е).

Поэтому в контуре замкнутой накоротко э. д. с. возникает большой ток I_K , называемый током короткого замыкания.

Короткие замыкания подразделяются на трехфазные, двухфазные и однофазные в зависимости от числа замкнувшихся фаз;

на замыкания с землей и без земли; замыкания в одной и двух точках сети (рис. 1-1).

При к. з. вследствие увеличения тока возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети, так как напряжение в любой точке M (рис. 1-2, а) $\dot{U}_M = \dot{E} - \dot{I}_K z_M$, где $\dot{E}$ — э. д. с. источника питания, а z_M — сопротивление от источника питания до точки M .

Наибольшее снижение напряжения происходит в месте к. з. (точка K) и в непосредственной близости от него (рис. 1-2, а). В точках сети, удаленных от места повреждения, напряжение снижается в меньшей степени.

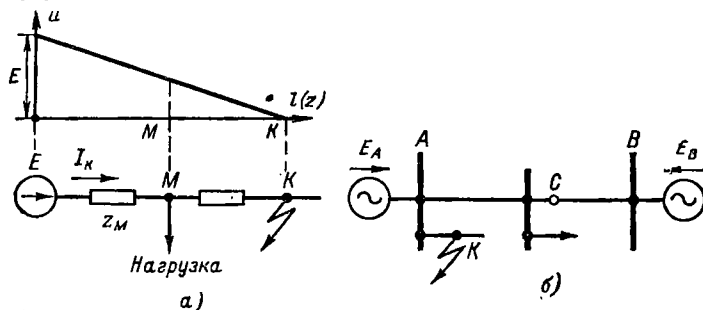


Рис. 1-2. Влияние понижения напряжения при к. з.

а — на работу потребителей; б — на энергосистему.

Происходящие в результате к. з. увеличение тока и снижению напряжения приводят к ряду опасных последствий:

а) Ток к. з. I_K согласно закону Джоуля—Ленца выделяет в активном сопротивлении r цепи, по которой он проходит в течение времени t , тепло $Q = kI_K^2 rt$.

В месте повреждения это тепло и пламя электрической дуги производят большие разрушения, размеры которого тем больше, чем больше ток I_K и время t .

Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток к. з. I_K нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждение изоляции и токоведущих частей.

б) Понижение напряжения при к. з. нарушает работу потребителей.

Основным потребителем электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей M_d пропорционален квадрату напряжения U на их зажимах: $M_d = kU^2$.

Поэтому при глубоком снижении напряжения момент вращения электродвигателей может оказаться меньше момента сопротивления механизмов, что приводит к их остановке.

Нормальная работа осветительных установок, составляющих вторую значительную часть потребителей электроэнергии, при снижении напряжения также нарушается.

Особенно чувствительны к понижениям напряжения вычислительные и управляющие машины, широко внедряемые в последнее время.

в) Вторым, наиболее тяжелым последствием снижения напряжения является нарушение устойчивости параллельной работы генераторов. Это может привести к распаду системы и прекращению питания всех ее потребителей.

Причины такого распада можно пояснить на примере системы, приведенной на рис. 1-2, б. В нормальном режиме механический момент вращения турбин уравнивается противодействующим моментом, создаваемым электрической нагрузкой генераторов, в результате чего частота вращения всех турбогенераторов постоянна и равна синхронной. При возникновении к. з. в точке K у шин электростанции A напряжение на них станет равным нулю, в результате этого электрическая нагрузка, а следовательно, и противодействующий момент генераторов также станут равными нулю. В то же время в турбину поступает прежнее количество пара (или воды) и ее момент остается неизменным. Вследствие этого частота вращения турбогенератора начнет быстро увеличиваться, так как регулятор скорости турбины действует медленно и не сможет предотвратить ускорения вращения турбогенераторов станции A .

В иных условиях находятся генераторы станции B . Они удалены от точки K , поэтому напряжение на их шинах может быть близким к нормальному. Вследствие того что генераторы электростанции A перегрузились, вся нагрузка системы ляжет на генераторы станции B , которые при этом могут перегрузиться и уменьшить частоту вращения. Таким образом, в результате к. з. скорость вращения генераторов электростанций A и B становится различной, что приводит к нарушению их синхронной работы.

При длительном к. з. может также произойти нарушение устойчивости работы асинхронных электродвигателей. При понижении напряжения частота вращения асинхронных электродвигателей уменьшается.

Если скольжение превзойдет критическое значение, двигатель перейдет в область неустойчивой работы, произойдет его опрокидывание и полное торможение.

С увеличением скольжения реактивная мощность, потребляемая асинхронными двигателями, растет, что может привести после отключения к. з. к дефициту реактивной мощности и как следствие этого к лавинообразному снижению напряжения во всей системе и прекращению ее работы.

Аварии с нарушением устойчивости системы по величине ущерба, наносимого электроснабжению, являются самыми тяжелыми.

Рассмотренные последствия к. з. подтверждают сделанный выше вывод, что они являются тяжелым и опасным видом повреждения, требующим быстрого отключения (см. § 1-4).

Замыкание на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью или заземленной через большое сопротивление дугогасящей катушки (ДГК). На рис. 1-1, д видно, что замыкание на землю не вызывает короткого замыкания, так как э. д. с. E_A поврежденной фазы A не шунтируется появившимся в точке K соединением с землей. Возникающий при этом ток I_A в месте повреждения замыкается через емкость C проводов относительно земли и имеет поэтому, как правило, небольшую величину, например несколько

десятков ампер. Линейные напряжения при этом виде повреждения остаются неизменными (см. гл. 9).

Благодаря этому по своим последствиям однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью или заземленной через ДГК существенно отличается от к. з. Оно не отражается на работе потребителей и не нарушает синхронной работы генераторов. Однако этот вид повреждения создает ненормальный режим, вызывая перенапряжения, что представляет опасность с точки зрения возможности нарушения изоляции относительно земли двух неповрежденных фаз и перехода однофазного замыкания на землю в междуфазное к. з. (рис. 1, е).

1.3. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ

К ненормальным относятся режимы, связанные с отклонениями от допустимых значений величин тока, напряжения и частоты, опасные для оборудования или устойчивой работы энергосистемы.

Рассмотрим наиболее характерные ненормальные режимы.

а) **Перегрузка оборудования**, вызванная увеличением тока сверх номинального значения. Номинальным называется максимальный ток, допускаемый для данного оборудования в течение неограниченного времени.

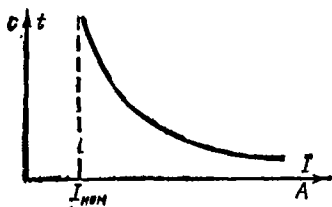


Рис. 1-3. Зависимость допустимой длительности перегрузки от величины тока $t = f(I)$.

$I_{ном}$ — номинальный ток оборудования.

Если ток, проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделяемого им дополнительного тепла температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превосходит допустимую величину, что приводит к ускоренному износу изоляции и ее повреждению. Время, допустимое для прохождения повышенных токов, зависит от их величины. Характер этой

зависимости показан на рис. 1-3 и определяется конструкцией оборудования и типом изоляционных материалов. Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке необходимо принять меры к разгрузке или отключению оборудования.

б) **Качания в системах** возникают при выходе из синхронизма работающих параллельно генераторов (или электростанций) A и B (рис. 1-2, б). При качаниях в каждой точке системы происходит периодическое изменение («качание») тока и напряжения. Ток во всех элементах сети, связывающих вышедшие из синхронизма генераторы A и B , колеблется от нуля до максимального значения, во много раз превышающего нормальную величину. Напряжение падает от нормального до некоторого минимального значения, имеющего разную величину в каждой точке сети. В точке C , назы-

ваемой электрическим центром качаний, оно снижается до нуля, в остальных точках сети напряжение падает, но остается больше нуля, нарастая от центра качания C к источникам питания A и B . По характеру изменения тока и напряжения качания похожи на к. з. Возрастание тока вызывает нагревание оборудования, а уменьшение напряжения нарушает работу всех потребителей системы. Качание — очень опасный ненормальный режим, отражающийся на работе всей энергосистемы.

в) **Повышение напряжения** сверх допустимого значения возникает обычно на гидрогенераторах при внезапном отключении их нагрузки. Разгрузившийся гидрогенератор увеличивает частоту вращения, что вызывает возрастание э. д. с. статора до опасных для его изоляции значений. Защита в таких случаях должна снизить ток возбуждения генератора или отключить его.

Опасное для изоляции оборудования повышение напряжения может возникнуть также при одностороннем отключении или включении длинных линий электропередачи с большой емкостной проводимостью.

Кроме отмеченных ненормальных режимов, имеются и другие, ликвидация которых возможна при помощи релейной защиты.

1-4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ

1. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ОТ К. З.

а) Селективность

Селективностью или избирательностью защиты называется способность защиты отключать при к. з. только поврежденный участок сети.

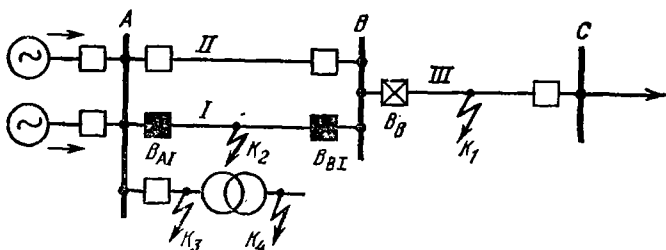


Рис. 1-4. Селективное отключение поврежденного участка при к. з. в сети

На рис. 1-4 показаны примеры селективного отключения повреждений. Так, при к. з. в точке K_1 защита должна отключить поврежденную линию выключателем B_B , т. е. выключателем, близким к месту повреждения. При этом все потребители, кроме питавшихся от поврежденной линии, остаются в работе.

В случае к. з. в точке K_2 при селективном действии защиты должна отключаться поврежденная линия I, линия II остается в работе. При таком отключении все потребители сети сохраняют питание. Этот пример показывает, что если подстанция связана с сетью несколькими линиями, то селективное отключение к. з. на одной из линий позволяет сохранить связь этой подстанции с сетью, обеспечив тем самым бесперебойное питание потребителей.

Таким образом, селективное отключение повреждения является основным условием для обеспечения надежного электроснабжения потребителей. Неселективное действие защиты приводит к развитию аварий. Как будет показано ниже, неселективные отключения могут допускаться, но только в тех случаях, когда это диктуется необходимостью и не отражается на питании потребителей.

б) Быстрота действия

Отключение к. з. должно производиться с возможно большей быстротой для ограничения размеров разрушения оборудования, повышения эффективности автоматического повторного включения линий и сборных шин, уменьшения продолжительности снижения напряжения у потребителей и сохранения устойчивости параллельной работы генераторов, электростанций и энергосистемы в целом. Последнее из перечисленных условий является главным.

Допустимое время отключения к. з. (1-2, б) по условию сохранения устойчивости зависит от ряда факторов. Важнейшим из них является величина остаточного напряжения на шинах электростанций и узловых подстанций, связывающих электростанции с энергосистемой. Чем меньше остаточное напряжение, тем вероятнее нарушение устойчивости и, следовательно, тем быстрее нужно отключать к. з. *Наиболее тяжелыми по условиям устойчивости являются трехфазные к. з. и двухфазные к. з. на землю в сети с глухозаземленной нейтралью* (рис. 1-2, а и г), так как при этих повреждениях происходят наибольшие снижения всех междуфазных напряжений.

В современных энергосистемах для сохранения устойчивости требуется весьма малое время отключения к. з. Так, например, на линиях электропередачи 300—500 кВ необходимо отключать повреждение за 0,1—0,12 с после его возникновения, а в сетях 110—220 кВ — за 0,15—0,3 с. В распределительных сетях 6 и 10 кВ, отделенных от источников питания большим сопротивлением, к. з. можно отключать со временем примерно 1,5—3 с, так как они не вызывают опасного понижения напряжения на генераторах и не влияют поэтому на устойчивость системы. Точная оценка допустимого времени отключения производится с помощью специальных расчетов устойчивости, проводимых для этой цели.

В качестве приближенного критерия (меры) необходимости применения быстродействующих защит Правила устройств электроустановок (ПУЭ) [Л. 1] рекомендуют определять остаточное напряжение на шинах электростанций и узловых подстанций

при трехфазных к. з. в интересующей нас точке сети. Если остаточное напряжение получается меньше 60% номинального, то для сохранения устойчивости следует применять быстрое отключение повреждений, т. е. применять быстродействующую защиту.

Полное время отключения повреждения $t_{откл}$ складывается из времени работы защиты t_z и времени действия выключателя t_v , разрывающего ток к. з., т. е. $t_{откл} = t_z + t_v$. Таким образом, для ускорения отключения нужно ускорять действие как защиты, так и выключателей. Наиболее распространенные выключатели действуют со временем 0,15—0,06 с.

Чтобы обеспечить при таких выключателях указанное выше требование об отключении к. з., например, с $t = 0,2$ с, защита должна действовать с временем 0,05—0,12 с, а при необходимости отключения с $t = 0,12$ с и действия выключателя с 0,08 с время работы защиты не должно превышать 0,04 с.

Защиты, действующие с временем до 0,1—0,2 с, считаются быстродействующими. Современные быстродействующие защиты могут работать с временем 0,02—0,04 с.

Требование быстродействия является в ряде случаев определяющим условием, обеспечивающим устойчивость параллельной работы электростанций и энергосистем.

Создание селективных быстродействующих защит является важной и трудной задачей техники релейной защиты. Эти защиты получаются достаточно сложными и дорогими, поэтому они должны применяться только в тех случаях, когда более простые защиты, работающие с выдержкой времени, не обеспечивают требуемой быстроты действия.

В целях упрощения допускается применение простых быстродействующих защит, не обеспечивающих необходимой селективности. При этом для исправления неселективности используется АПВ, быстро включающее обратно неселективно отключившийся участок системы.

в) Чувствительность

Для того чтобы защита реагировала на отклонения от нормального режима, которые возникают при к. з. (увеличение тока, снижение напряжения и т. п.), она должна обладать определенной чувствительностью в пределах установленной зоны ее действия. Каждая защита (например, I на рис. 1-5) должна отключать повреждения на том участке АВ, для защиты которого она установлена (первый участок защиты I), и, кроме того, должна действовать при к. з. на следующем, втором участке ВС, защищаемом защитой II. Действие защиты на втором участке называется д а л ь н и м р е з е р в и р о в а н и е м. Оно необходимо для отключения к. з. в том случае, если защита II или выключатель участка ВС не сработает из-за неисправности. Резервирование следующего участка является важным требованием. Если оно не будет выпол-

няться, то при к. з. на участке *BC* и отказе его защиты или выключателя повреждение останется неотключенным, что приведет к нарушению работы потребителей всей сети.

Действие защиты *I* при к. з. на третьем участке не требуется, так как при отказе защиты третьего участка или его выключателя должна подействовать защита *II*. Одновременный отказ защиты на двух участках (третьем и втором) маловероятен, и поэтому с таким случаем не считаются.

Некоторые типы защит по принципу своего действия не работают за пределами первого участка. Чувствительность таких защит должна обеспечить их надежную работу в пределах первого участка. Для обеспечения резервирования второго участка в этом случае устанавливается дополнительная защита, называемая резервной.

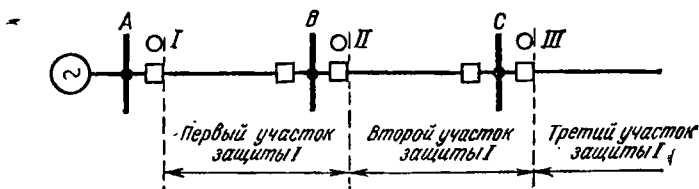


Рис. 1-5. Зоны действия защиты.

Каждая защита должна действовать не только при металлическом к. з., но и при замыканиях через переходное сопротивление, обусловливаемое электрической дугой.

Чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она могла подействовать при к. з. в минимальных режимах системы, т. е. в таких режимах, когда изменение величины, на которую реагирует защита (ток, напряжение и т. п.), будет наименьшей. Например, если на станции *A* (рис. 1-5) будет отключен один или несколько генераторов, то ток к. з. уменьшится, но чувствительность защит должна быть достаточной для действия и в этом минимальном режиме.

Таким образом, чувствительность защиты должна быть такой, чтобы она действовала при к. з. в конце установленной для нее зоны в минимальном режиме системы и при замыканиях через электрическую дугу.

Чувствительность защиты принято характеризовать коэффициентом чувствительности $k_{\text{ч}}$. Для защит, реагирующих на ток к. з.,

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к. мин}}}{I_{\text{с. з}}}, \quad (1.1)$$

где $I_{\text{к. мин}}$ — минимальный ток к. з.; $I_{\text{с. з}}$ — наименьший ток, при котором защита начинает работать (ток срабатывания защиты).

г) Надежность

Требование надежности состоит в том, что защита должна безотказно работать при к. з. в пределах установленной для нее зоны и не должна работать неправильно в режимах, при которых ее работа не предусматривается.

Требование надежности является весьма важным. Отказ в работе или неправильное действие какой-либо защиты всегда приводит к дополнительным отключениям, а иногда к авариям системного значения.

Например, при к. з. в точке *K* (рис. 1-6) и отказе защиты *B1* сработает защита *B3*, в результате чего дополнительно отключаются подстанции *II* и *III*, а при неправильной работе в нормаль-

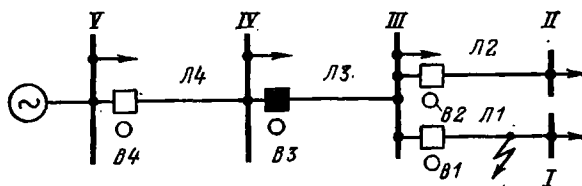


Рис. 1-6. Неселективное отключение к. з. из-за отказа защиты.

ном режиме защиты *B4* в результате отключения линии *Л4* потеряют питание потребители подстанций *I*, *II*, *III* и *IV*. Таким образом, ненадежная защита сама становится источником аварий.

Надежность защиты обеспечивается простотой схемы, уменьшением в ней количества реле и контактов, простотой конструкции и качеством изготовления реле и другой аппаратуры, качеством монтажных материалов, самого монтажа и контактных соединений, а также уходом за ней в процессе эксплуатации.

В последнее время ведутся разработки методики оценки и анализа надежности устройств релейной защиты с помощью теории вероятности [Л. 33].

В СССР обычно применяют следующие методы:

например кратковременная перегрузка при пуске асинхронного электродвигателя. В таких случаях быстрое отключение не только не является необходимым, но может причинить ущерб потребителям. Поэтому отключение оборудования при ненормальном режиме должно производиться только тогда, когда наступает действительная опасность для защищаемого оборудования, т. е. в большинстве случаев с выдержкой времени.

В тех случаях, когда устранение ненормальных режимов может произвести дежурный персонал, защита от ненормальных режимов может выполняться с действием только на сигнал.

1-5. ЭЛЕМЕНТЫ ЗАЩИТЫ, РЕЛЕ И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ

Обычно устройства релейной защиты состоят из нескольких реле, соединенных друг с другом по определенной схеме.

Реле представляет собой автоматическое устройство, которое приходит в действие (срабатывает) при определенном значении воздействующей на него входной величины.

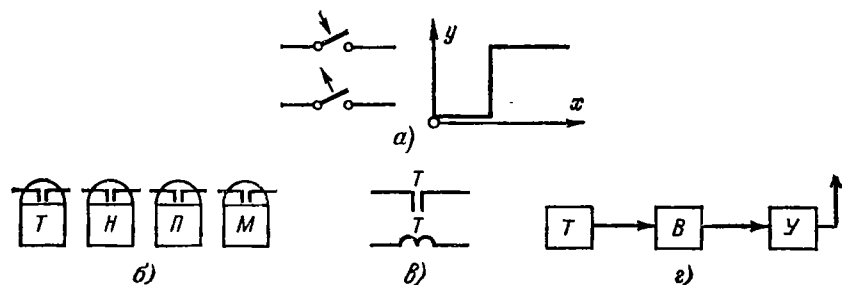


Рис. 1-7. Условное изображение реле на принципиальных схемах.

В релейной технике применяются реле с контактами — электромеханические, бесконтактные — на полупроводниках или на ферромагнитных элементах. У первых при срабатывании замыкаются или размыкаются контакты. У вторых — при определенном значении входной величины x скачкообразно меняется выходная величина y , например напряжение (рис. 1-7, а).

Каждый комплект защиты и его схема подразделяются на две части: реагирующую и логическую.

Реагирующая (или измерительная) часть является главной, она состоит из основных реле, которые непрерывно получают информацию о состоянии защищаемого элемента и реагируют на повреждения или ненормальные режимы, подавая соответствующие команды на логическую часть защиты.

Логическая часть (или оперативная) является вспомогательной, она воспринимает команды реагирующей части и, если их значение, последовательность и сочетание соответствуют

заданной программе, производит заранее предусмотренные операции и подает управляющий импульс на отключение выключателей. Логическая часть может выполняться с помощью электромеханических реле или схем с использованием электронных приборов — ламповых или полупроводниковых.

В соответствии с этим подразделение защитных устройств реле также делятся на две группы: на основные, реагирующие на повреждения, и вспомогательные, действующие по команде первых и используемые в логической части схемы.

Признаком появления к. з. могут служить возрастание тока I , понижение напряжения U и уменьшение сопротивления защищаемого участка, характеризуемого отношением напряжения к току в данной точке сети: $z = U/I$.

Соответственно этому в качестве реагирующих реле применяют: токовые реле, реагирующие на величину тока; реле напряжения, реагирующие на величину напряжения, и реле сопротивления, реагирующие на изменение сопротивления.

В сочетании с указанными реле часто применяются реле мощности, реагирующие на величину и направление (знак) мощности к. з., проходящий через место установки защиты.

Реле, действующие при возрастании величины, на которую они реагируют, называются максимальными, а реле, работающие при снижении этой величины, называются минимальными.

Для защит от ненормальных режимов, так же как и для защит от к. з., используются реле тока и напряжения. Первые служат в качестве реле, реагирующих на перегрузку, а вторые — на опасное повышение или снижение напряжения в сети. Кроме того, применяется ряд специальных реле, например, реле частоты, действующие при недопустимом снижении или повышении частоты; тепловые реле, реагирующие на увеличение тепла, выделяемого током при перегрузках, и некоторые другие.

К числу вспомогательных реле относятся: реле времени, служащие для замедления действия защиты; реле указательные — для сигнализации и фиксации действия защиты; реле промежуточные, передающие действие основных реле на отключение выключателей и служащие для осуществления взаимной связи между элементами защиты.

Каждое реле можно подразделить на две части: воспринимающую и исполнительную. Воспринимающий элемент в электромеханических конструкциях имеет обмотку, которая питается током или напряжением защищаемого элемента в зависимости от типа реле (токовые или напряжения).

Реле мощности и реле сопротивления имеют две обмотки (тока и напряжения). Через обмотки реле воспринимает изменение той электрической величины, на которую оно реагирует.

Исполнительный элемент электромеханического реле представляет собой подвижную систему, которая, перемещаясь под воздей-

ствием сил, создаваемых воспринимающим элементом, действует на контакты реле, заставляя их замыкаться или размыкаться.

Имеются также реле, в которых подвижная система действует непосредственно механическим путем на отключение выключателя, такие реле не имеют контактов.

1-6. СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ РЕЛЕ И СХЕМ ЗАЩИТЫ НА ЧЕРТЕЖАХ

Применяются два принципиально различных способа изображения схем защит и реле на чертежах.

По первому способу реле показываются в совмещенном виде (рис. 1-7, б) и изображаются в виде прямоугольника с полукругом наверху. Обмотки реле подразумеваются расположенными в нижней части (прямоугольнике) и обычно не показываются, контакты реле рисуют в верхней части изображения (таким образом, контакты и обмотки реле совмещаются в одном изображении). Тип реле обозначается начальной буквой наименования реле в нижней части изображения. Например: токовое реле обозначается буквой *T*, реле напряжения — *H*, промежуточное — *П*, мощности — *М* и т. д.

По второму способу реле показываются в развернутом виде (рис. 1-7, в). Обмотки реле и их контакты обозначают соответствующей буквой и рисуют отдельно на двух разных схемах (измерительных цепей и логических), исходя из соображений большей наглядности схем (см. рис. 4-20, б, в, г).

В развернутых схемах цепи, питающиеся током сети, напряжением сети и источником оперативного тока, показываются отдельно, что облегчает рассмотрение («чтение») схем с большим числом реле и сложной связью между ними.

В 1964 г. в СССР введен стандарт (ГОСТ 7624-62) [Л. 7] на графические изображения электрических схем. В дальнейшем изложении все схемы изображаются в соответствии с этим стандартом. *Положение контактов реле на схемах условились изображать в состоянии, соответствующем отсутствию тока в обмотках реле.* В книге, в отдельных случаях (для облегчения понимания схемы) контакты реле показываются в положении готовности устройства к действию (т. е. для нормального состояния защищаемого объекта). Такие случаи оговариваются в подписях под рисунками.

В последнее время в связи с применением защит с полупроводниковыми приборами получили распространение блок-схемы или структурные схемы. Такие схемы (рис. 1-7, г) дают взаимосвязь между отдельными элементами (блоками) схемы. Каждый блок изображается прямоугольником с надписью или условным обозначением внутри прямоугольника. Блок-схемы должны дополняться схемой соединения каждого блока в отдельности.

1.7. СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НА ТОК И НАПРЯЖЕНИЕ СЕТИ

Обмотки реле могут включаться на ток и напряжение сети непосредственно или через измерительные трансформаторы тока и напряжения (рис. 1-8). Реле первого типа называются **первичными**, второго типа — **вторичными**.

Наибольшее распространение имеют реле вторичные, преимущества которых по сравнению с первичными состоят в том, что они изолированы от высокого напряжения, располагаются на некотором расстоянии от защищаемого элемента, в удобном для обслуживания месте и могут выполняться стандартными на один и те же номинальные токи 5 или 1 А и номинальные напряжения 100 В независимо от напряжения и тока первичной цепи защищаемого элемента.

Достоинством первичных реле является то, что для их включения не требуется измерительных трансформаторов, источников оперативного тока (см. § 1-8) и контрольного кабеля. Первичные реле находят применение на электродвигателях, мелких трансформаторах и линиях малой мощности в сетях 3—6—10 кВ, т. е. там, где защита осуществляется по простейшим схемам посредством реле тока и напряжения и не требует большой точности. Во всех остальных случаях применяются вторичные реле.

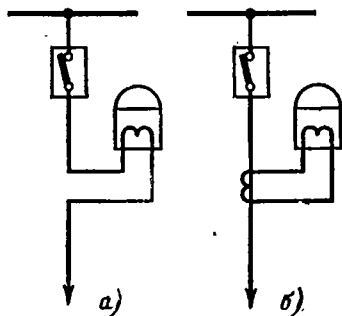


Рис. 1-8. Способы включения токовых реле.

а — первичных; б — вторичных.

1.8. СПОСОБЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ

Существует два способа воздействия защиты на отключение выключателя: **прямой** и **косвенный**. Защита со вторичными реле прямого действия 1 показана на рис. 1-9. Реле 1 срабатывает, когда электромагнитная сила F_z , создаваемая обмоткой реле, станет больше силы F_p противодействующей пружины. При срабатывании реле его подвижная система 2 воздействует непосредственно (прямо) на расцепляющий рычаг 3 выключателя, после чего выключатель отключается под действием пружины 4.

Реле прямого действия устанавливаются непосредственно в приводе выключателя, поэтому их часто называют **встроенными**.

Защита с вторичным реле косвенного действия изображена на рис. 1-10. При срабатывании реле 1 его контакты замыкают цепь обмотки электромагнита 2, называемого **катушкой**

отключения выключателя. Под действием напряжения U , подводимого к зажимам этой цепи от специального источника, в катушке отключения 2 появляется ток, сердечник 3 катушки отключения преодолевает сопротивление F_n пружины 5 и, втягиваясь, освобождает защелку 4; после чего выключатель отключается под действием пружины 6.

После отключения выключателя ток в обмотке исчезает и контакты реле размыкаются. Чтобы облегчить их работу по размыканию цепи, в которой проходит ток катушки отключения, предусмотрен вспомогательный блокировочный контакт БК, который размыкает цепь катушки отключения еще до того, как начнут размыкаться контакты реле.

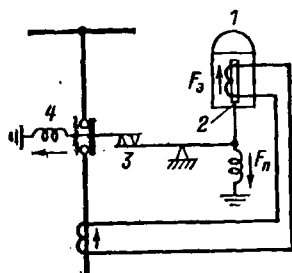


Рис. 1-9. Вторичное реле прямого действия.

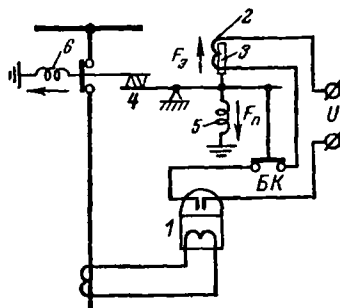


Рис. 1-10. Вторичное реле косвенного действия.

Как видно из схемы на рис. 1-10, для защиты с реле косвенного действия необходим вспомогательный источник напряжения — источник оперативного тока. Защита с реле прямого действия не требует источника оперативного тока, но реле этой защиты должны развивать большие усилия для того, чтобы непосредственно расцепить механизм выключателя. Поэтому реле прямого действия не могут быть очень точными и имеют большое потребление мощности.

Усилия, развиваемые реле косвенного действия, могут быть незначительными, поэтому они отличаются большей точностью и малым потреблением. Кроме того, в защитах, которые состоят из нескольких реле, взаимодействие между ними проще осуществляется при помощи оперативного тока, а не механическим путем. В силу изложенного наиболее широко применяется защита со вторичными реле косвенного действия.

Для простых токовых защит имеются вполне надежные конструкции токовых реле прямого действия, которые часто применяются в сетях среднего напряжения 6, 10, 30 кВ там, где отмеченные недостатки защит прямого действия не являются существенными.

1-9. ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

а) Назначение и общие требования

Оперативным током называется ток, питающий цепи дистанционного управления выключателями, оперативные цепи релейной защиты, автоматики, телемеханики и различные виды сигнализации.

Питание оперативных цепей и особенно тех ее элементов, от которых зависит отключение поврежденных линий и оборудования, должно отличаться особой надежностью. Поэтому главное требование, которому должен отвечать источник оперативного тока, состоит в том, чтобы во время к. з. и при ненормальных режимах в сети напряжение источника оперативного тока и его мощность имели достаточную величину как для действия вспомогательных реле защиты и автоматики, так и для надежного отключения и включения соответствующих выключателей.

Для питания оперативных цепей применяются источники постоянного и переменного тока.

б) Постоянный оперативный ток

В качестве источника постоянного тока используются аккумуляторные батареи с напряжением 110—220 В, а на небольших подстанциях 24—48 В, от которых осуществляется централизованное питание оперативных цепей всех присоединений (рис. 1-11). Для повышения надежности сеть постоянного тока секционирована на несколько участков, имеющих самостоятельное питание от сборных шин батарей.

Самым ответственным участком являются цепи защиты, автоматики и катушек отключения, питаемые от шин управления ШУ. Вторым очень важным участком являются цепи катушек включения, питаемые от отдельных шин ШВ вследствие больших токов (400—500 А), потребляемых катушками включения масляных выключателей. И, наконец, третьим, менее ответственным участком является сигнализация, питающаяся от шин ШС. Остальные потребители постоянного тока (аварийное освещение, двигатели собственных нужд) питаются по отдельной сети. Защита оперативных цепей от к. з. осуществляется предохранителями или специальными автоматами (реагирующими на увеличение тока).

Для своевременного выявления неисправностей в оперативных цепях состояние отдельных элементов цепи контролируется с помощью специальных устройств.

Исправность предохранителей контролируется реле РС (рис. 1-11). Целость цепи отключения КО и блок-контактов БК обычно контролируется реле РК, дающим сигнал при обрыве цепи (рис. 1-12, а).

В сетях постоянного тока возможны замыкания на землю. В случае замыканий на землю в точках K_1 и K_2 (рис. 1-12, б) контакты реле РЗ шунти-

руются и в катушке отключения KO появляется ток, под действием которого выключатель может отключиться.

Чтобы предупредить подобные отключения, применяется контроль за появлением «земли» на постоянном токе. Контроль осуществляется при помощи вольтметров V_1 и V_2 и сигнального реле P_K , как показано на рис. 1-11.

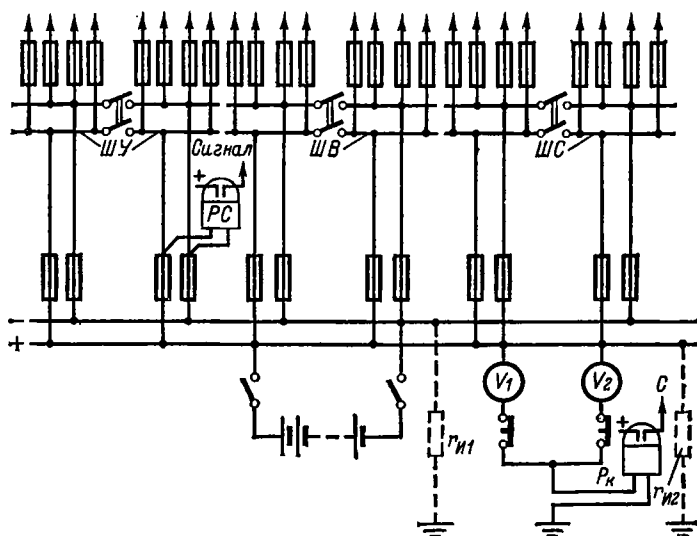


Рис. 1-11. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты, цепей управления и сигнализации постоянным током.

Аккумуляторные батареи обеспечивают питание оперативных цепей в любой момент времени с необходимым уровнем напряжения и мощности независимо от состояния основной сети и поэтому являются самым надежным источником питания.

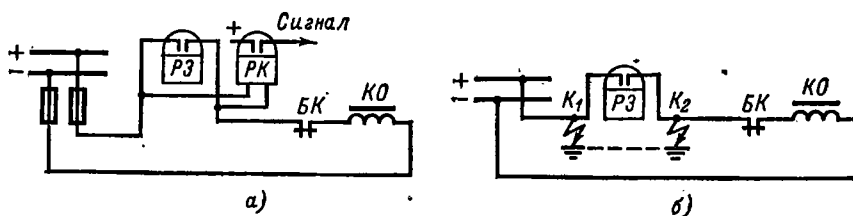


Рис. 1-12. Цепь отключения выключателя.

а — контроль целостности цепи с помощью последовательно включенного реле (РК); б — образование ложной цепи на отключение выключателя при замыкании на землю и двух точках сети постоянного тока.

В то же время аккумуляторные батареи значительно дороже других источников оперативного тока, для них требуются зарядные агрегаты, специальное помещение и квалифицированный уход.

Кроме того, из-за централизации питания создается сложная, протяженная и дорогостоящая сеть постоянного тока.

В связи с этим за последнее время получает применение и переменный оперативный ток.

в) Переменный оперативный ток

Для питания оперативных цепей переменным током используется ток или напряжение сети. В соответствии с этим в качестве источников переменного оперативного тока служат трансформаторы тока, трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд.

Трансформаторы тока являются весьма надежным источником питания оперативных цепей для защит от к. з. При к. з. ток и напряжение на зажимах трансформаторов тока увеличиваются, поэтому в момент срабатывания защиты мощность трансформаторов тока возрастает, что и обеспечивает надежное питание оперативных цепей.

Однако трансформаторы тока не обеспечивают необходимой мощности при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся увеличением тока на защищаемом присоединении. Поэтому их нельзя использовать для питания защит от замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, защит от витковых замыканий в трансформаторах и генераторах или защит от таких ненормальных режимов, как повышение или понижение напряжения и понижение частоты.

Трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд непригодны для питания оперативных цепей защит от к. з., так как при к. з. напряжение в сети резко снижается и может в неблагоприятных случаях становиться равным нулю. В то же время при повреждениях и ненормальных режимах, не сопровождающихся глубокими понижениями напряжения в сети, трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд могут использоваться для питания таких защит, как, например, защиты от перегрузки, от замыканий на землю, повышения напряжения и т. д.

Заряженный конденсатор. Помимо непосредственного использования мощности трансформаторов тока и напряжения можно использовать энергию, накопленную в предварительно заряженном конденсаторе.

Разрядный ток конденсатора, имеющий необходимые величину и продолжительность, может питать оперативную цепь в момент действия защиты независимо от характера повреждения или ненормального режима в сети. Предварительный заряд конденсатора обычно осуществляется в нормальном режиме от напряжения сети. При исчезновении напряжения на подстанции запасенная конден-

сатором энергия сохраняется. Поэтому заряженный конденсатор может использоваться также для питания защит и автоматов, которые должны работать при исчезновении напряжения на подстанции.

Питание цепей управления выключателями. Дистанционное управление выключателями и их автоматическое включение от АПВ или АВР должно производиться при любых нагрузках на присоединении и при отсутствии напряжения на шинах подстанции, чего не обеспечивают трансформаторы тока. Поэтому питание цепей дистанционного управления, АПВ и АВР производится от трансформаторов напряжения, трансформаторов собственных нужд и заряженных конденсаторов. Чтобы обеспечить производство операции по включению при отсутствии

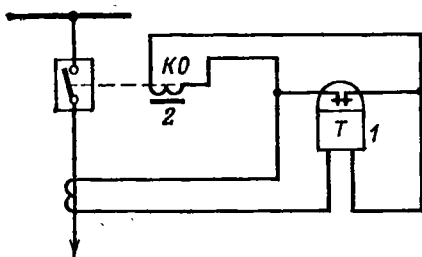


Рис. 1-13. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током непосредственно от трансформатора тока.

напряжения на шинах, трансформаторы, питающие цепи управления, подключаются к линиям, питающим подстанцию (рис. 1-13, б), или на выключателях устанавливаются механические приводы, действующие за счет энергии поднятого груза или сжатой пружины.

Таким образом, каждый источник переменного оперативного тока имеет свою, рассмотренную выше, область применения. При этом возможность использования того или иного

источника определяется мощностью, которую он может дать в момент производства операций.

Мощность источника питания должна с некоторым запасом превосходить мощность, потребляемую оперативными цепями, основной составляющей которой является мощность, затрачиваемая приводом на отключение и включение выключателей.

Наибольшие затруднения из-за недостаточной мощности возникают при применении трансформаторов тока и трансформаторов напряжения. Учитывая, что включение и отключение выключателей является кратковременной операцией, можно допускать значительные перегрузки измерительных трансформаторов без ущерба для них.

На практике применяется схема питания от трансформаторов тока, показанная на рис. 1-13.

В нормальном режиме катушка отключения выключателя 2 зашунтирована контактами реле 1 и ток в ней отсутствует. При к. з. реле 1 срабатывает, его контакты размыкаются и ток трансформаторов тока поступает в катушку отключения 2, приводя ее в действие.

Практическое применение получила схема, приведенная на рис. 4-18—4-20, в которой используются реле со специальными мощными переключающими контактами.

Схемы комбинированного питания от трансформаторов тока и трансформаторов напряжения. Для повышения мощности и создания универсального источника, пригодного для питания защит как от к. з., так и от повреждений и ненормальных режимов, не сопровождающихся увеличением тока, ВНИИЭ разработаны специальные блоки питания. Принципиальная схема комбинированного блока питания приведена на рис. 1-14.

Ток от трансформатора тока и напряжение от трансформатора напряжения подводятся к промежуточным трансформаторам ПНТ и ПТН. Их вторичное напряжение выпрямляется выпрямителями B_1 и B_2 , суммируется и подается на оперативные цепи защиты. Блоки тока БПТ и напряжения БПН выпускаются отдельно, что позволяет применять их порознь и вместе. При этом комбинированный блок легко получается параллельным включением выходных цепей БПТ и БПН. Для ограничения величины вторичного тока трансформатор ПНТ выполняется насыщающимся. Чтобы избежать появления опасных пиков напряжений, во вторичной цепи ПНТ установлен конденсатор C , сглаживающий кривую вторичного напряжения. Напряжение на выходе блока U_B определяется током и напряжением сети. При к. з. необходимое значение выходного напряжения обеспечивается за счет трансформаторов тока, а при повреждениях и ненормальных режимах с малым током — за счет трансформатора напряжения. Таким образом, комбинированный блок может питать защиты от всех видов повреждения и ненормальных режимов, и в то же время позволяет иметь на выключателе только одну катушку отключения.

Блоки питания особенно удобны для питания защит, имеющих сложную схему оперативных цепей, состоящую из большого числа вспомогательных реле.

Схемы с питанием от трансформаторов напряжения или собственных нужд показаны на рис. 1-15, а, б. Схема на рис. 1-15, а применяется только для питания оперативных цепей защит. Для питания цепей управления и включения обычно используется выпрямленный ток (рис. 1-15, б). Выпрямление осуществляется селеновыми выпрямителями 2. Трансформатор 1, питающий цепи управления, необходимо под-

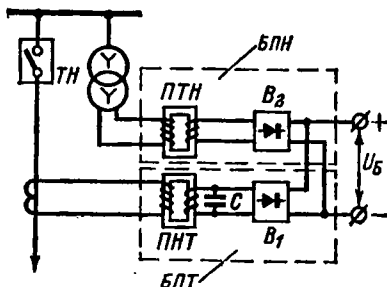


Рис. 1-14. Принципиальная схема комбинированного блока питания для питания оперативных цепей защиты выпрямленным переменным током.

Однако наличие таких недостатков электромеханических реле, как большие размеры, значительное потребление мощности от трансформаторов тока и напряжения, трудности в обеспечении надежной работы контактов побудили к поискам более совершенных принципов выполнения реле. Новые принципы исполнения реле с помощью полупроводниковых приборов позволяют существенно улучшить параметры и характеристики реле и перейти полностью или частично на бесконтактные схемы защит. Постепенно новые принципы выполнения реле находят все большее практическое применение.

Помимо реле, реагирующих на электрические величины, для защиты электрических машин и аппаратов применяются реле, реагирующие на неэлектрические величины, косвенным образом характеризующие появления повреждений или ненормальных режимов в них. Например, имеются реле, реагирующие на появления газов или повышение давления в кожухах маслонаполненных трансформаторов и реакторов; реле, реагирующие на повышение температуры трансформаторов и электрических машин и т. д.

Реле, реагирующие на электрические величины, можно подразделить на три группы:

реле, реагирующие на одну электрическую величину: ток или напряжение;

реле, реагирующие на две электрические величины: ток и напряжение сети или два напряжения U_I и U_{II} , каждое из которых является линейной функцией тока и напряжения сети;

реле, реагирующие на три или больше электрические величины, например: три тока и три напряжения сети, или несколько напряжений, представляющих линейные функции токов и напряжения сети.

К первой группе относятся реле тока и реле напряжения. Ко второй принадлежат однофазные реле: мощности, сопротивления и некоторые другие. К третьей относятся трехфазные реле мощности, многофазные реле сопротивления и другие устройства.

В данной главе рассматриваются наиболее распространенные принципы устройства основных типов электромеханических реле и реле на полупроводниковых приборах, применяемые во всех видах защит.

Принципы действия и устройство реле, предназначенных для отдельных защит: дифференциальных, дистанционных и других — рассматриваются в главах, посвященных этим защитами.

2-2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Электромеханические реле могут выполняться на электромагнитном, индукционном, электродинамическом, индукционно-динамическом и магнитоэлектрическом принципах. Отечественная промышленность изготавливает электромеханические реле в основ-

ном на электромагнитном и индукционном принципах, которые позволяют создать все требующиеся в эксплуатации разновидности реле.

Переходя к рассмотрению электромеханических конструкций, следует отметить некоторые наиболее важные и общие требования, предъявляемые к основным элементам этих реле: контактам и обмоткам.

Контакты реле являются очень ответственным элементом в схемах защит. Они должны обеспечить надежное замыкание и размыкание тока в управляемых ими цепях и быть рассчитаны на многократное действие.

Коммутационная способность контактов условно характеризуется мощностью, при которой они обеспечивают замыкание и размыкание цепей.

Значение этой мощности S_k выражается как произведение напряжения источника оперативного тока U на наибольший ток I_k , прохождение которого допускается через контакт, т. е. $S_k = UI_k$.

Обмотки реле должны обладать термической стойкостью, характеризуемой в зависимости от типа реле значениями тока или напряжения, допускаемыми длительно и кратковременно, и иметь приемлемую потребляемую мощность S_p , характеризуемую произведением тока I_p , проходящего по обмотке, на напряжение U_p на зажимах этой обмотки.

Потребляемая мощность S_p зависит от усилий, которые должны создать намагничивающие силы обмоток для приведения в действие подвижной системы реле и надежного замыкания контактов реле.

2-3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ

а) Принцип действия

На рис. 2-1 представлены три основные разновидности конструкций электромагнитных реле.

Каждая конструкция содержит электромагнит 1, состоящий из стального сердечника и обмотки, стальной подвижный якорь 2, несущий подвижный контакт 3, неподвижные контакты 4 и противодействующую пружину 5.

Проходящий по обмотке электромагнита ток I_p создает намагничивающую силу (п. с.) $I_p w_p$, под действием которой возникает магнитный поток Φ , замыкающийся через сердечник электромагнита 1, воздушный зазор δ и якорь 2. Якорь намагничивается и в результате этого притягивается к полюсу электромагнита. Переместившись в конечное положение, якорь своим подвижным контактом 3 замыкает неподвижные контакты реле 4. Начальное положение якоря ограничивается упором 6.

Электромagnetная сила, притягивающая стальной якорь к электромагниту [Л. 29], пропорциональна квадрату магнитного потока Φ в воздушном зазоре¹:

$$F_z = k\Phi^2. \quad (2-1)$$

Магнитный поток Φ и создающий его ток I_p связаны соотношением

$$\Phi = \frac{I_p \omega_p}{R_m}, \quad (2-2)$$

где R_m — магнитное сопротивление пути, по которому замыкается магнитный поток Φ , а ω_p — количество витков обмотки реле.

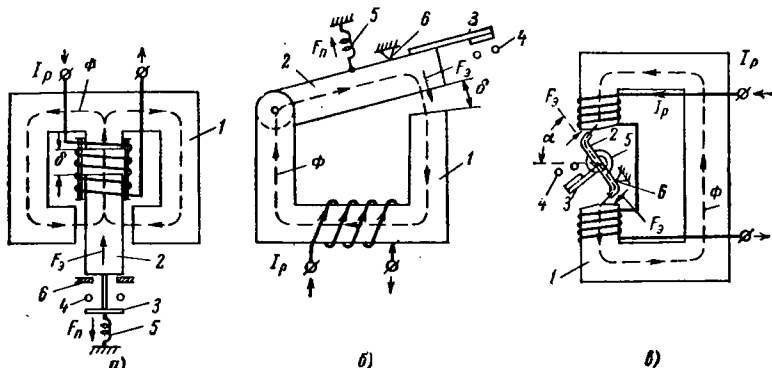


Рис. 2-1. Типы электромагнитных реле.

а — с втягивающимся якорем; б — с поворотным якорем; в — с поперечным движением якоря.

Подстановка выражения (2-2) в (2-1) дает:

$$F_z = k \frac{\omega_p^2}{R_m^2} I_p^2 = k' I_p^2. \quad (2-3)$$

У реле с поворотным якорем и с поперечным движением якоря (рис. 2-1, б и в) электромагнитная сила F_z образует вращающий момент:

$$M_z = F_z l_p = k'' I_p^2, \quad (2-4)$$

где l_p — плечо силы F_z .

Коэффициенты k' и k'' в выражениях (2-3) и (2-4) зависят от R_m и поэтому сохраняют постоянное значение только при отсутствии насыщения.

Из (2-3) и (2-4) следует, что сила притяжения F_z или ее момент M_z пропорциональны квадрату тока I_p в обмотке реле и имеют, следовательно, постоянное направление, не зависящее от направления (знака) этого тока. Поэтому электромагнитный принцип пригоден для выполнения реле как постоянного, так и перемен-

¹ При питании обмотки реле переменным током под Φ подразумевается мгновенное значение потока $\Phi_t = \Phi_m \sin \omega t$.

ного тока и широко используется для изготовления реле тока, напряжения, промежуточных сигнальных и реле времени.

При перемещении якоря электромагнитного реле уменьшаются воздушный зазор δ (рис. 2-1) и соответственно R_M . При постоянстве тока в реле уменьшение R_M вызывает увеличение магнитного потока Φ [см. формулу (2-3)], что обуславливает в свою очередь соответствующее возрастание силы F_a . Таким образом, сила F_a и момент M_a являются некоторыми функциями положения якоря δ [а в системах с поперечным движением якоря (рис. 2-1, в) — углом α] и возрастают с уменьшением воздушного зазора.

Наиболее просто эта зависимость находится для реле с поворотным якорем (рис. 2-1, б), у которых магнитное поле в воздушном зазоре однородно. В этом случае магнитное сопротивление воз-

душного зазора $R_M = \delta/4\mu\kappa$. Подставляя его в (2-3) и пренебрегая магнитным сопротивлением пути по стали, получаем:

$$F_a = k \frac{I_p^2}{\delta^2}. \quad (2-5)$$

Следовательно, сила притяжения у реле с поворотным якорем обратно пропорциональна квадрату воздушного зазора δ .

У реле с поперечным движением якоря и с втягивающимся якорем поле в воздушном зазоре нельзя считать однородным. Для этих конструкций зависимость $R_M = f(\delta)$, $F_a =$

Рис. 2-2. Зависимость магнитного сопротивления R_M , электромагнитной силы F_a и электромагнитного момента M_a от воздушного зазора δ .

а — реле с поворотным якорем $F_a = f(\delta)$;
б — реле с поперечным движением якоря $M_a = f(\alpha)$.

$= f(\delta)$ и $M_a = f(\alpha)$ имеет сложный характер (рис. 2-2, а и б). Силу F_a и момент M_a можно выразить через производную магнитной проводимости воздушного зазора [Л. 9] уравнением

$$M_a \equiv F_a = \frac{1}{2} w_p^2 I_p^2 \frac{dG_M}{d\delta}, \quad (2-6)$$

где G_M — магнитная проводимость, равная $1/R_M$.

Это выражение носит общий характер. Оно справедливо при отсутствии насыщения для всех конструкций электромагнитных реле и обычно используется при их расчетах.

Кривые на рис. 2-2 построены в предположении, что ток при перемещении якоря не меняется, т. е. что он не зависит от реактивного сопротивления x_p обмотки реле, изменяющегося при изменении магнитного потока Φ . К этой группе реле относятся токовые реле, питающиеся переменным током сети (I_p), на который не влияют параметры реле, и реле постоянного тока, у которых I_p не зависит от x_p .

б) Ток срабатывания, ток возврата и коэффициент возврата

Ток срабатывания. Для срабатывания реле необходимо, чтобы электромагнитная сила или ее момент превосходили силы сопротивления пружины $F_{\text{п}}$, трения и массы $F_{\text{т}}$ или соответствующие моменты $M_{\text{п}}$ и $M_{\text{т}}$. Реле начинает действовать, когда

$$F_{\text{э}} = F_{\text{э, с.р}} = F_{\text{п}} + F_{\text{т}} \text{ или } M_{\text{э}} = M_{\text{э, с.р}} = M_{\text{п}} + M_{\text{т}}. \quad (2-7)$$

Величинам $F_{\text{э, с.р}}$ и $M_{\text{э, с.р}}$ соответствует определенный наименьший ток $I_{\text{р}}$, необходимый для срабатывания.

Наименьший ток, при котором реле срабатывает, называется током срабатывания и обозначается $I_{\text{ср}}$.

Подставляя в (2-4) $M_{\text{с.р}}$ вместо $M_{\text{э}}$, находим ток

$$I_{\text{р}} = I_{\text{с.р}} = \frac{R_{\text{м}}}{w_{\text{р}}} \sqrt{\frac{M_{\text{с.р}}}{k}}, \quad (2-8)$$

где $M_{\text{с.р}} = M_{\text{п}} + M_{\text{т}}$.

В большинстве конструкций предусматривается возможность регулирования $I_{\text{с.р}}$, которое, как это следует из (2-8), можно осуществлять путем изменения числа витков обмотки реле $w_{\text{р}}$, момента $M_{\text{п}}$ противодействующей пружины, размера воздушного зазора δ с учетом, что $R_{\text{м}} = f(\delta)$.

Наиболее простыми и удобными для практического исполнения являются два первых способа.

Регулирование пружиной позволяет изменять ток срабатывания плавно. При регулировании изменением числа витков ток срабатывания меняется ступенями.

Ток возврата. Возврат прижатого якоря в исходное положение при уменьшении тока в обмотке реле происходит под действием пружины 5 (рис. 2-1). Для возврата необходимо, чтобы момент $M_{\text{п}}$ преодолел электромагнитный момент $M_{\text{э, воз}}$ и момент трения $M_{\text{т}}$.

Как следует из рис. 2-3, на котором показан характер изменения моментов $M_{\text{э}}$ и $M_{\text{п}}$ в зависимости от положения якоря, характеризующего воздушным зазором δ , для возврата якоря реле (из положения срабатывания $\delta = \delta_2$) необходимо уменьшить $M_{\text{э2}}$,

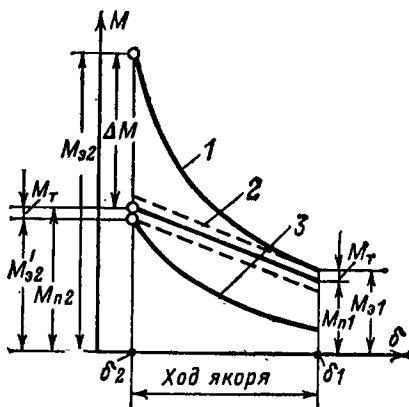


Рис. 2-3. Диаграмма электромагнитных и механических сил при срабатывании и возврате токового реле.

1 — $M_{\text{э}} = f(\delta)$ при $I_{\text{р}} = I_{\text{с.р}} = \text{пост.}$; 2 — $M_{\text{п}} = f(\delta)$; 3 — $M_{\text{э}} = f(\delta)$ при $I_{\text{р}} = I_{\text{воз.р}} = \text{пост.}$

снизив ток I_p до значения, при котором момент M_{δ_2} уменьшится до M'_{δ_2} . Тогда момент пружины $M_{п2}$ преодолет электромагнитный момент M'_{δ_2} и трения M_T и заставит якорь вернуться из положения δ_2 в начальное положение δ_1 . Условия возврата определяются уравнением (см. рис. 2-3)

$$M_{п2} = M'_{\delta_2} + M_T, \quad (2-9)$$

где M'_{δ_2} является наибольшим значением M_{δ} , при котором начинается возврат реле; его называют моментом возврата $M_{\delta, \text{воз}}$. Соответствующий ему ток I_p обозначается $I_{\text{воз}}$, при этом токе обеспечивается условие возврата (2-9).

Таким образом, током возврата реле $I_{\text{воз}}$ называется наибольший ток в реле, при котором якорь реле возвращается в начальное положение.

Коэффициент возврата. Отношение токов $I_{\text{воз}}/I_{\text{с.р}}$ называется коэффициентом возврата $k_{\text{воз}}$. Учитывая, что по формуле (2-4) $M_{\delta} \equiv I_p^2$, получаем:

$$k_{\text{воз}} = \frac{I_{\text{воз}}}{I_{\text{с.р}}} = \sqrt{\frac{M_{\delta \text{воз}}}{M_{\text{с.р}}}}. \quad (2-10)$$

У реле, реагирующих на возрастание тока, $I_{\text{с.р}} > I_{\text{воз}}$ и $k_{\text{воз}} < 1$. Величина $k_{\text{воз}}$ у различных конструкций колеблется в довольно широких пределах, от 0,1 до 0,98. Из (2-10) следует, что $k_{\text{воз}}$ зависит от соотношения $M_{\delta, \text{с.р}}$ и $M_{\delta, \text{воз}}$.

Для выяснения условий срабатывания и возврата реле и способов изменения $k_{\text{воз}}$ рассмотрим диаграмму моментов, действующих на якорь реле в функции от величины воздушного зазора δ (рис. 2-3).

Предположим, что в обмотку электромагнитного реле (например, с поворотным якорем — рис. 2-1, б) подан ток, равный току срабатывания. Возникающий при этом электромагнитный момент $M_{\delta 1}$ преодолевает сопротивление пружины и трение ($M_{п1}$ и M_T) и приводит в движение якорь. Началу движения якоря соответствует соотношение моментов: $M_{\delta 1} = M_{п1} + M_T$.

По мере перемещения якоря воздушный зазор δ уменьшается от начального значения δ_1 до конечного δ_2 (рис. 2-3), противодействующая пружина растягивается и ее момент $M_{п}$ (прямая 2) при этом нарастает по линейному закону (обратно пропорционально изменению δ). Электромагнитный момент M_{δ} (кривая 1) также увеличивается, но по нелинейной зависимости (2-5), имеющей для реле с поворотным якорем вид параболы. Когда якорь достигает конечного положения δ_2 , то благодаря более быстрому нарастанию M_{δ} по сравнению с $M_{п}$ образуется избыточный момент $\Delta M = M_{\delta 2} - M_{п2}$. Для возврата якоря необходимо уменьшить ток в обмотке реле от $I_{\text{с.р}}$ до значения $I_{\text{в.р.}}$, при котором электромагнитный момент M_{δ} снизится от

$$M'_{\delta} = k \frac{I_{\text{с.р}}^2}{\delta_1^2} \text{ до } M'_{\delta 2} = k \frac{I_{\text{в.р.}}^2}{\delta_2^2} \text{ (рис. 2-3).}$$

При этом условии момент пружины $M_{п2}$ преодолевает электромагнитный момент $M'_{\delta 2}$ и момент трения M_T , и якорь реле возвращается в начальное положение δ_1 .

Приведенная диаграмма моментов позволяет сделать вывод, что различие в значениях $I_{\text{воз}}$ и $I_{\text{с.р}}$ вызывается различием (неидентичностью) характера изменения моментов M_{δ} и $M_{п}$ при перемещении якоря из начального положения в конечное.

Из диаграммы (рис. 2-3) следует, что чем больше избыточный момент ΔM и трение M_T , тем больше разница между $I_{\text{воз}}$ и $I_{\text{с.р}}$ и, следовательно, меньше $k_{\text{воз}}$.

Для улучшения коэффициента возврата необходимо обеспечить:

а) совпадение или наибольшее сближение характеристик изменения моментов $M_{\text{э}}$ и $M_{\text{п}}$ (прямая 2 и кривая 1), что достигается подбором такого участка кривой $M_{\text{э}} = f(\delta)$, где имеется лучшее совпадение с характеристикой пружины $M_{\text{п}} = f(\delta)$. На диаграмме рис. 2-2, б таким участком является отрезок AB , которому соответствует угол поворота якоря от α_1 до α_2 .

Улучшения $k_{\text{воз}}$ можно достигнуть также за счет сокращения хода подвижной системы изменением конечного положения якоря δ_2 , что приводит к уменьшению ΔM (рис. 2-3);

б) уменьшение трения в осях подвижной системы (якоря) реле. Некоторое ухудшающее влияние на $k_{\text{воз}}$ оказывает гистерезис.

в) Реле максимального и минимального действия

Рассмотренные реле действуют при возрастании тока в их обмотке и поэтому они называются максимальными.

Реле, действующие при уменьшении тока, называются минимальными. В нормальных условиях якорь минимального реле находится в притянутом положении (рис. 2-4); при этом $M_{\text{э}} > M_{\text{п}}$ и контакты реле разомкнуты. Для срабатывания реле необходимо уменьшить ток в реле до такого значения, при котором момент пружины превзойдет электромагнитный момент и момент трения $M_{\text{п}} > M_{\text{э}} + M_T$, в результате чего якорь реле отойдет и контакты реле замкнутся.

Током срабатывания минимального реле называется наибольший ток, при котором отпадает якорь реле, а током возврата — наименьший ток, при котором притягивается якорь реле. Как и у максимальных реле, отношение $I_{\text{воз}}$ к $I_{\text{с.р}}$ называется коэффициентом возврата реле. У минимальных реле $I_{\text{воз}} > I_{\text{с.р}}$, поэтому $k_{\text{воз}} > 1$.

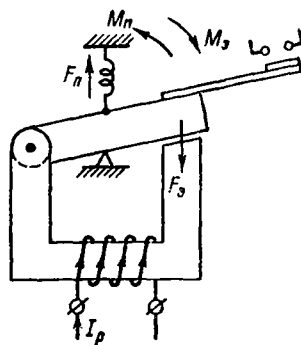


Рис. 2-4. Принцип устройства реле минимального тока или напряжения.

г) Работа электромагнитного реле на переменном токе

Реле переменного тока питается током $i_p = I_m \sin \omega t$, при этом мгновенное значение $F_{\text{эл}} = ki_p^2 = kI_m^2 \sin^2 \omega t$. С учетом, что $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$, получим $F_{\text{эл}} = kI_m^2 - kI_m^2 \cos 2\omega t$.

Следовательно, мгновенное значение $F_{\text{эл}}$ содержит две составляющие: постоянную kI_m^2 и переменную $kI_m^2 \cos 2\omega t$, изменяющуюся с двойной частотой. Результирующая электромагнитная сила $F_{\text{э}}$ имеет пульсирующий характер, дважды изменяясь от нуля до максимального значения в течение каждого периода (рис. 2-5). В то же время противодействующая сила пружины $F_{\text{п}}$ имеет неизменное значение.

В результате в период времени ab, cd, ef и т. д., когда $F_{\text{п}} > F_{\text{эл}}$, якорь реле стремится отпасть, а в периоды времени bc, de и т. д., когда $F_{\text{эл}} > F_{\text{п}}$ — вновь втянуться. Притянутый якорь при этом непрерывно вибрирует вследствие периодического изменения знака действующей на него результирующей силы $F_{\text{рез}} = F_{\text{эл}} - F_{\text{п}}$.

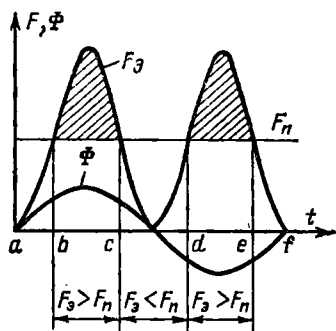


Рис. 2-5. Изменение силы притяжения якоря $F_{\text{э}}$ электромагнитного реле при прохождении по его обмотке переменного тока.

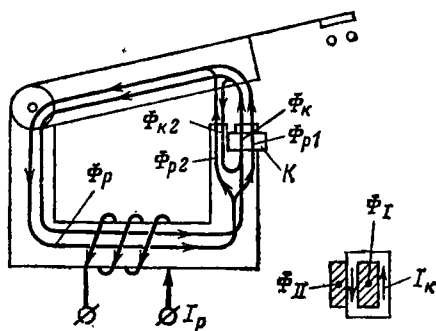


Рис. 2-6. Принцип устройства электромагнитного реле с короткозамкнутым витком.

Вибрация якоря оказывает вредное влияние на работу реле, вызывает вибрацию контактов при срабатывании, что приводит к их подгоранию, а также вызывает износ осей и цапф, на которые они опираются.

При большом моменте инерции якоря он не успевает следовать за быстрым изменением знака результирующей силы $F_{\text{рез}} = F_{\text{э}} - F_{\text{п}}$, в таких случаях вибрации не наблюдается. Если же момент инерции якоря недостаточен, то для устранения вибрации применяется расщепление магнитного потока обмотки на две составляющие, сдвинутые по фазе. Расщепление достигается или при помощи короткозамкнутого витка K (рис. 2-6), или путем выполнения обмотки реле в виде двух параллельных секций с разными угловыми сдвигами, расположенных на разных магнитопроводах (рис. 2-9).

В реле, изображенном на рис. 2-6, короткозамкнутый виток охватывает часть сечения магнитопровода. Под влиянием магнитного потока, пронизывающего виток, в нем возникает ток $I_{\text{к}}$, созда-

ющий поток Φ_K . На рис. 2-6 показаны положительные направления магнитных потоков и пути, по которым они замыкаются.

Из-под сечения, охваченного короткозамкнутым витком, выходит результирующий поток $\dot{\Phi}_I$, состоящий из части потока обмотки реле $\dot{\Phi}_{p1}$ и потока $\dot{\Phi}_K$, проходящих через это сечение:

$$\dot{\Phi}_I = \dot{\Phi}_{p1} + \dot{\Phi}_K. \quad (2-11)$$

Из-под сечения, не охваченного короткозамкнутым витком, выходит магнитный поток $\dot{\Phi}_{II}$, состоящий из потока обмотки реле $\dot{\Phi}_{p2}$ и части магнитного потока короткозамкнутого витка $\dot{\Phi}_{K2}$:

$$\dot{\Phi}_{II} = \dot{\Phi}_{p2} - \dot{\Phi}_{K2}. \quad (2-12)$$

Построение диаграммы на рис. 2-7 начинается с вектора $\dot{\Phi}_I$. Затем строится э. д. с. E_K , наведенная в короткозамкнутом витке потоком $\dot{\Phi}_I$, отстающая от него на 90° . Ток в короткозамкнутом витке $\dot{I}_K$ почти совпадает с э. д. с. E_K вследствие малой индуктивности витка. Пренебрегая потерями на намагничивание, поток $\dot{\Phi}_K$ показываем совпадающим с создающим его током $\dot{I}_K$.

Зная $\dot{\Phi}_I$ и $\dot{\Phi}_K$, из выражения (2-11) находим:

$$\dot{\Phi}_{p1} = \dot{\Phi}_I - \dot{\Phi}_K.$$

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{p2}$ совпадает по фазе с потоком $\dot{\Phi}_{p1}$, так как они создаются одной и той же н. с. ($I_p w_p$) и имеют однородное магнитное сопротивление. На основании выражения (2-12) находится поток $\dot{\Phi}_{II}$.

Полученная векторная диаграмма (рис. 2-7) показывает, что магнитный поток $\dot{\Phi}_I$ всегда сдвигнут относительно потока $\dot{\Phi}_{II}$ на угол ψ . Сдвиг по фазе магнитных потоков обусловлен наличием потока $\dot{\Phi}_K$.

Рис. 2-8. Изменение силы притяжения якоря $F_{рез}$ у электромагнитного реле с короткозамкнутым витком при прохождении по его обмотке переменного тока.

Каждый из магнитных потоков (рис. 2-8) $\Phi_I = \Phi_{I\max} \sin \omega t$ и $\Phi_{II} = \Phi_{II\max} \sin (\omega t + \psi)$ создает силы $F_{эI}$ и $F_{эII}$, кривые изменения которых смещены так же, как и магнитные потоки. В результате этого при уменьшении одного из потоков второй нарастает, не позволяя электромагнитной силе понизиться до нуля.

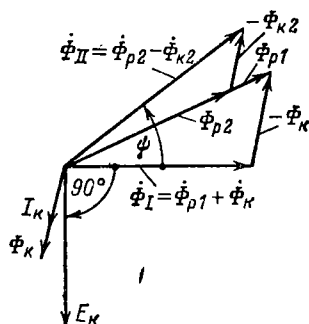
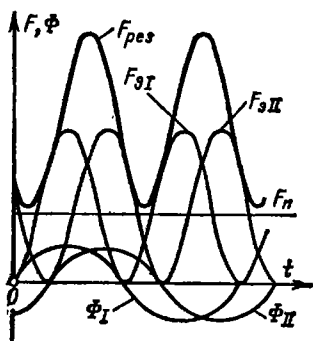


Рис. 2-7. Векторная диаграмма магнитных потоков реле на рис. 2-6.



Для устранения вибрации результирующая сила

$$F_{\text{рез}} = F_{\text{эл}} + F_{\text{эл}} = k_1 \Phi_I^2 \sin^2 \omega t + k_2 \Phi_{II}^2 \sin^2 (\omega t + \psi) \quad (2-12a)$$

должна в каждый момент времени превышать $F_{\text{п}}$. Наилучшие результаты получаются при $\psi = 90^\circ$ и $\Phi_I = \Phi_{II}$; в этом случае $F_{\text{рез}}$ имеет постоянное значение, что следует из (2-12a).

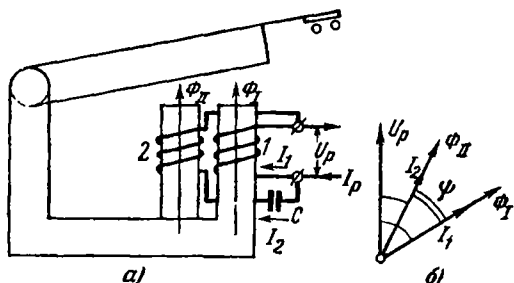


Рис. 2-9. Принцип устройства электромагнитного реле с расщепленным магнитопроводом. а — устройство реле; б — векторная диаграмма.

Аналогичный результат достигается при исполнении обмотки реле в виде двух секций: 1 и 2, расположенных на двух полюсах магнитопровода (рис. 2-9, а).

Обмотка 1 подключается непосредственно к источнику питания, а обмотка 2 — через конденсатор C . В результате токи I_1 и I_2

имеют различные сдвиги относительно напряжения U_p на зажимах реле. Построив векторную диаграмму (рис. 2-9, б) токов и потоков, установившем, что потоки Φ_I и Φ_{II} имеют сдвиг по фазе ψ . Следовательно, результирующая электромагнитная сила $F_{\text{рез}}$ имеет такой же характер, как и на рис. 2-8 и выражается по (2-12a).

2-4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЛЕ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ

а) Токовые реле

При включении обмотки электромагнитного реле на ток сети непосредственно или через трансформаторы тока его электромагнитный момент $M_{\text{э}} = kI_c^2$. Такое реле называется токовым, так как его поведение зависит от тока сети I_c .

Для уменьшения нагрузки на трансформаторы тока токовые реле должны иметь по возможности малое потребление мощности. Обмотки токовых реле должны рассчитываться на длительное прохождение токов нагрузки и кратковременное — токов к. з. Коэффициент возврата реле должен приближаться к единице.

Конструкция токового реле типа ЭТ520 показана на рис. 2-10 [Л. 10, 11]. Время действия этого реле примерно 0,02—0,04 с; потребление 0,1 В·А на минимальной установке срабатывания; коэффициент возврата не менее 0,85. Ток срабатывания регулируется плавным изменением натяжения пружины. Обмотка реле состоит из двух секций, что позволяет путем параллельного и последовательного включений секций изменять пределы регулирования тока срабатывания в 4 раза.

На рис. 2-11 приведена конструкция нового токового реле с поперечным движением якоря типа РТ-40. В этом реле улучшена контактная система и увеличен противодействующий момент, в результате последнего потребление мощности у него больше, чем у

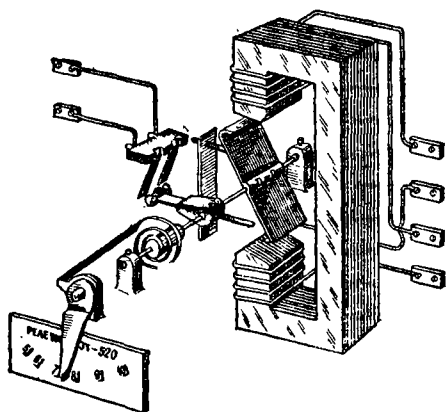


Рис. 2-10. Токовое электромагнитное реле типа ЭТ-520.

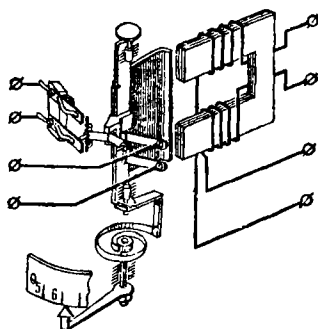


Рис. 2-11. Токовое электромагнитное реле типа РТ-40.

реле ЭТ. Потребление РТ-40 на минимальной уставке для реле разной чувствительности колеблется от 0,2 до 8 В·А.

б) Реле напряжения

Включая обмотку реле на напряжение сети непосредственно или через трансформатор напряжения, получим реле, реагирующее на величину напряжения сети U_c .

Действительно, $M_a = kI_p$, но ток в реле $I_p = U_p/z_p$, где z_p — сопротивление обмотки реле; U_p — напряжение на зажимах реле.

Следовательно, $M_a = k'U_p^2$ или с учетом, что $U_p = U_c/n_n$, $M_a = k''U_c^2$. Это означает, что поведение реле определяется напряжением сети.

При движении якоря изменение воздушного зазора δ не вызывает изменения магнитного потока, а следовательно, и электромагнитного момента реле M_a ; в этом состоит существенное отличие реле напряжения от токовых реле. Причина этого заключается в том, что при уменьшении δ возрастает индуктивное сопротивление обмотки реле $x_p = \omega L$, вызывающее уменьшение тока в реле $I_p = U_p/x_p$. Одновременно с этим уменьшает-

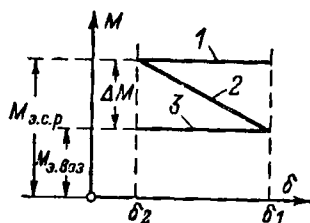


Рис. 2-12. Диаграмма электромагнитных и механических моментов при срабатывании и возврате реле напряжения.

1 — $M_a = f(\delta)$ при $U_p = U_{cp} = \text{пост.}$; 2 — $M_{\Pi} = f(\delta)$; 3 — $M_a = f(\delta)$ при $U_p = U_{воз} = \text{пост.}$

ся и сопротивление магнитной цепи реле R_m . При этом влияние изменения тока I_p компенсируется соответствующим изменением магнитного сопротивления R_m , в результате чего магнитный поток реле $\Phi = I_p W_p / R_m$ остается неизменным.

Составляя кривые $M_a = f_1(\delta)$ и $M_n = f_2(\delta)$ на рис. 2-12, легко видеть, что коэффициент возврата реле будет низким. Для повышения коэффициента возврата обмотки реле напряжения выполняются с преобладанием активного сопротивления. Изменение реактивного сопротивления при таких условиях не оказывает заметного влияния на величину тока, и последний остается неизменным.

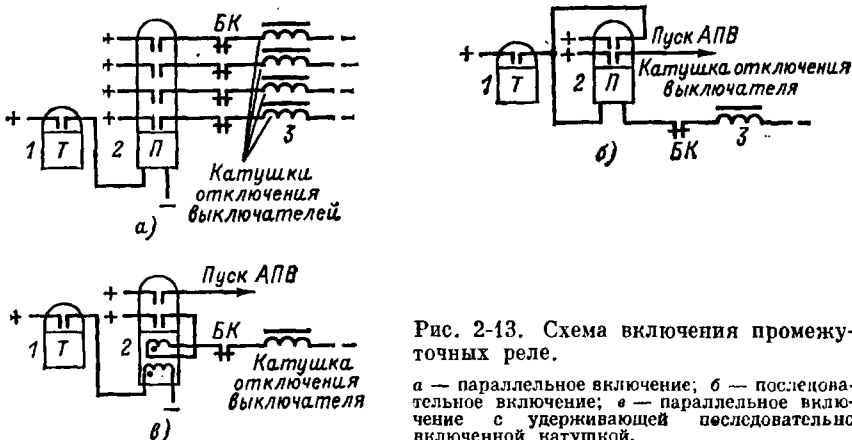
Тогда характер зависимости $M_a = f_1(\delta)$ будет соответствовать кривой 2 на рис. 2-2, что обеспечивает удовлетворительный коэффициент возврата.

Отечественные заводы изготавливают реле типов ЭН-520 и РН-50, конструкции их аналогичны изображенным на рис. 2-10 и 2-11 соответственно.

2-5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ РЕЛЕ

а) Назначение реле и требования к ним

Промежуточные реле являются вспомогательными и применяются, когда необходимо одновременно замыкать или размыкать несколько независимых цепей или когда требуется реле с мощными контактами для замыкания и размыкания цепи с большим током.



Простейший пример использования промежуточного реле в схемах защиты приведен на рис. 2-13, а — в.

Промежуточные реле по способу включения подразделяются на реле параллельного (рис. 2-13, а) и последовательного (рис. 2-13, б) включения.

Обмотки первых включаются на полное напряжение источника питания, а вторых — последовательно с катушкой отключения

выключателя или какого-либо другого аппарата или реле на ток цепи.

Кроме того, выпускаются реле с дополнительными удерживающими катушками, например реле параллельного включения с удерживающей обмоткой, включаемой последовательно в управляемую контактами реле цепь (рис. 2-13, в). Такое реле, действующее от кратковременного импульса, поданного в параллельно включенную обмотку, остается в сработанном состоянии под действием тока удержания, пока не завершится операция.

Для одновременного замыкания нескольких не связанных друг с другом цепей промежуточные реле имеют несколько контактов. Мощность контактов должна быть достаточной для замыкания и размыкания цепей защиты (обычно потребляющих 50—200 Вт) или цепей управления выключателей (1500—2000 Вт).

Потребление обмоток реле параллельного включения стремятся ограничить до 3—6 Вт, с тем чтобы их цепь могли замыкать реле с маломощными контактами.

Потребление обмоток реле последовательного включения выбирается из условия минимального падения напряжения в сопротивлении обмотки этого реле, которое допускается не более 5—10% нормального напряжения источника оперативного тока.

Промежуточные реле должны надежно действовать не только при нормальном напряжении, но и при возможном в условиях эксплуатации его понижении, достигающем 15—20%.

С учетом запаса напряжения срабатывания реле параллельного включения принимается 60—70% номинального значения.

К коэффициенту возврата промежуточных реле не предъявляется каких-либо требований, так как их возврат происходит при отсутствии тока в обмотке реле.

В схемах защиты промежуточные реле вносят нежелательное замедление, поэтому, за исключением особых случаев, их время должно быть очень малым, особенно когда они применяются в быстродействующих защитах.

Быстродействующие промежуточные реле должны работать со временем не более 0,01—0,02 с. Время срабатывания обычных промежуточных реле колеблется в зависимости от конструкции от 0,02 до 0,1 с.

6) Конструкции промежуточных реле постоянного тока [Л. 10]

Большинство промежуточных реле выполняется при помощи системы с поворотным якорем, позволяющей создавать большую электромагнитную силу при относительно малом потреблении и удобной для изготовления многоконтактных реле. Применяются также системы с втягивающимся якорем. На рис. 2-14 показаны образцы промежуточных реле. Реле типа РП-210 (рис. 2-14, а) имеют четыре контакта. Время их срабатывания равно 0,01 с, потребление 5—8 Вт, разрывная мощность контактов 50 Вт. Ши-

роекое распространение получили кодовые реле (КДР) (рис. 2-14, б). Время срабатывания этих реле равно 0,01—0,02 с, потребление обмотки не более 3 Вт.

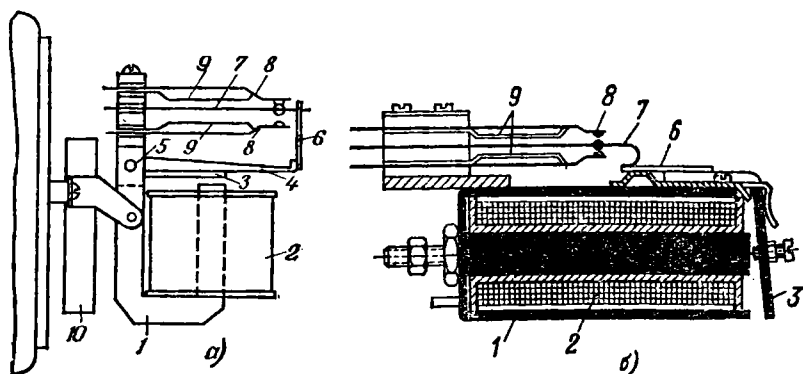


Рис. 2-14. Конструкция промежуточных реле.

а — типа РП-210; б — типа КДР-3: 1 — электромагнит; 2 — обмотка; 3 — якорь; 4 — подвижный рычаг; 5 — ось якоря; 6 — изолирующая пластина якоря; 7 — подвижные контакты; 8 — неподвижные контакты; 9 — упорные пластины; 10 — сопротивление добавочное.

Реле последовательного включения отличаются от реле параллельного включения лишь обмоточными данными.

в) Время действия промежуточных реле

При включении обмотки промежуточного реле на напряжение U_p ток в обмотке устанавливается не сразу. Он нарастает в течение некоторого времени от нуля до установившегося значения $I_{p,y} = U_p/r_p$, как показано на рис. 2-15.

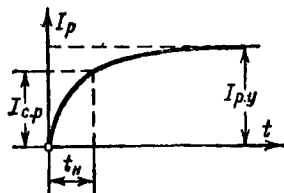


Рис. 2-15. Нарастание тока в обмотке промежуточного реле постоянного тока при замыкании ее цепи.

Кривая нарастания тока в реле [Л. 9] выражается уравнением

$$I_p = \frac{U_p}{r_p} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right), \quad (2-13)$$

где $T = L_p/r_p$ называется постоянной времени цепи обмотки реле.

Движение якоря начинается спустя некоторое время t_n , когда ток в реле достигнет значения $I_{c,p}$, необходимого для действия реле (рис. 2-15).

Перемещение якоря из начального положения в конечное, при котором замыкаются контакты реле, также требует некоторого времени t_d .

Таким образом, полное время действия реле t_p складывается из времени нарастания тока в обмотке якоря t_n до значения $I_{c.p}$ и времени движения якоря t_d :

$$t_p = t_n + t_d. \quad (2-14)$$

Из диаграммы на рис. 2-15 следует, что t_n зависит от скорости нарастания тока I_p , которая определяется постоянной времени T ; величины тока $I_{c.p}$, определяемой силой противодействующей пружины реле; величины установившегося тока $I_{p.y}$.

Составляющая t_d зависит от величины хода якоря и скорости его перемещения.

Абсолютное значение t_d невелико (составляет тысячные доли секунды), поэтому у реле постоянного тока время действия практически определяется t_n .

Для получения быстродействующих промежуточных реле нужно уменьшать T , ослаблять противодействующую пружину реле и увеличивать кратность тока $k = I_{p.y}/I_{c.p}$.

При включении реле в его сердечнике появляются вихревые токи, замедляющие нарастание магнитного потока и увеличивающие, таким образом, время t_n . Поэтому у быстродействующих реле магнитная система выполняется из шихтованной стали.

Уменьшение t_d в быстродействующих реле достигается в основном путем облегчения подвижной системы и уменьшения трения.

К числу быстродействующих реле, применяемых в отечественных защитах, относятся реле типа РП-210—РП-215, кодовые реле КДР-1 и реле МКУ [Л. 101]; их время действия $t_p = 0,01$ с.

г) Промежуточные реле постоянного тока замедленного действия

В ряде случаев в схемах защиты и автоматики требуются промежуточные реле, замыкающие или размыкающие свои контакты с некоторым замедлением. Замедление в таких реле получается за счет повышения составляющей t_n в (2-14) путем увеличения постоянной времени T обмотки.

Замедленное действие реле при втягивании якоря достигается размещением на магнитопроводе 3 короткозамкнутой обмотки 2, выполняемой в виде медной цилиндрической гильзы, или медных шайб, поверх которых наматывается основная обмотка 1 (рис. 2-16).

При включении обмотки 1 на напряжение U_p магнитный поток Φ_1 в магнитопроводе реле устанавливается не сразу.

В момент включения в обмотке 2 возникает ток I_2 , создающий магнитный поток Φ_2 , который противодействует нарастанию тока в обмотке 1. В результате этого скорость нарастания тока в обмотке реле уменьшается (рис. 2-17), а время нарастания тока t_n увеличивается.

Для увеличения времени действия реле необходимо располагать обмотки 1 и 2 концентрически так, чтобы весь магнитный поток Φ_2 обмотки 2 пронизывал обмотку 1, и увеличивать магнитный поток обмотки 2. Для этого следует увеличивать сечение медной гильзы (отчего возрастает ток I_2) и уменьшать сопротивление магнитопровода реле.

Практически выдержка времени на втягивание якоря в промежуточных реле с короткозамкнутой обмоткой относительно невелика и не превосходит 0,5 с.

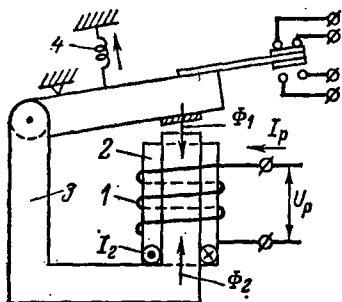


Рис. 2-16. Принцип устройства промежуточного реле замедленного действия.

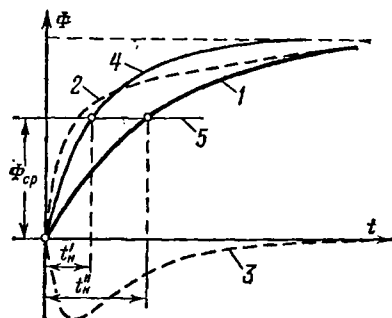


Рис. 2-17. Изменение магнитного потока Φ в обмотке промежуточного реле замедленного действия.

Замедленное действие при отпадании якоря также может быть получено при помощи короткозамкнутой обмотки 2 (рис. 2-16).

В момент отключения тока в обмотке 1 магнитный поток Φ_1 начинает затухать (рис. 2-18). При этом в обмотке 2 возникает ток I_2 , создающий магнитный поток Φ_2 , который противодействует исчезновению потока Φ_1 , и поэтому совпадает с ним по направлению¹.

Таким образом, несмотря на прекращение тока I_1 , в магнитопроводе реле продолжает существовать суммарный поток $\Phi_p = \Phi_1 + \Phi_2$, поддерживаемый в основном током I_2 .

Ток I_2 , а вместе с ним поток Φ_2 и, следовательно, поток Φ_p постепенно затухают (рис. 2-18).

При отсутствии обмотки 2 (рис. 2-16) затухание потока Φ_p в магнитопроводе происходило бы значительно быстрее, так как в этом случае он поддерживался бы только вихревыми токами, возникающими в стали магнитопровода, влияние которых незначительно.

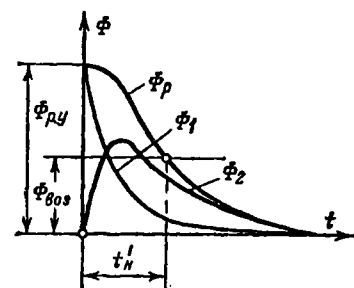


Рис. 2-18. Затухание магнитных потоков в магнитопроводе промежуточного реле замедленного действия при размыкании цепи его обмотки.

В этом случае он поддерживался бы только вихревыми токами, возникающими в стали магнитопровода, влияние которых незначительно.

¹ В этом случае ток I_2 и поток Φ_2 направлены противоположно показанному на рис. 2-16.

Чем больше постоянная времени короткозамкнутой обмотки $T_2 = L_2/r_2$, тем медленнее будет спадать магнитный поток Φ_2 . Через время t'_n магнитный поток Φ_p снизится до величины $\Phi_{воз}$; при этом сила пружины превзойдет электромагнитную силу и якорь реле начнет отходить. Спустя время t'_d он переместится в конечное положение. Таким образом, полное время отпадания реле равно $t'_n + t'_d$, при этом $t'_d \ll t'_n$.

Увеличение t'_n достигается уменьшением $\Phi_{воз}$, увеличением начального значения $\Phi_1 = \Phi_{p.y}$ (рис. 2-18) и снижением скорости затухания Φ_2 ; для последнего необходимо повышать постоянную времени короткозамкнутой обмотки T_2 .

Практически для увеличения времени замедления на отпадание якоря реле следует уменьшать зазор (при втянутом якоре), увеличивать размеры гильз, намагничивающую силу обмотки 1 и ослаблять противодействующую пружину 4 (рис. 2-16).

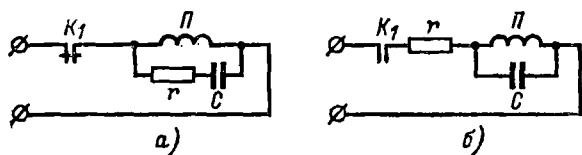


Рис. 2-19. Схема замедления действия промежуточных реле.

Π — обмотка промежуточного реле; K_1 — контакты промежуточного реле.

Отечественные заводы изготавливают реле типов РП-250, КДР-3 РЭВ-81, РЭВ-810, РЭВ-880, имеющие замедленный возврат [Л. 101].

Замедление с помощью контура C и r . Замедление при размыкании цепи промежуточных реле может достигаться при помощи схем, состоящих из резистора r (активного сопротивления) и конденсатора C , как показано на рис. 2-19, а, б. В схеме на рис. 2-19, а конденсатор C разряжается на обмотку Π при размыкании контактов K_1 , благодаря чему время отхода якоря увеличивается. Резистор r ограничивает ток через конденсатор в момент включения реле Π . При замыкании контактов K_1 на обмотку реле Π подается полное напряжение, и поэтому нарастание тока в ней определяется только ее параметрами.

В схеме на рис. 2-19, б действие реле замедляется как при замыкании, так и при размыкании цепи обмотки реле Π . В момент замыкания контактов K_1 происходит заряд конденсатора C . В нем появляется ток I_C , создающий повышенное падение напряжения на сопротивлении r . Вследствие этого напряжение на зажимах обмотки реле Π уменьшается: $U_{\Pi} = U - (I_C + I_{\Pi})r$, где U — напряжение источника питания; U_{Π} — напряжение на обмотке реле Π ; I_C и I_{Π} — токи в конденсаторе и обмотке реле. Пропорционально этому уменьшается и ток в обмотке Π .

По окончании заряда конденсатора прохождение тока I_C прекратится и на обмотке реле Π установится нормальное напряжение $U_{\Pi} = U - I_{\Pi} r$. При размыкании контактов K_1 конденсатор C разряжается на обмотку реле Π , удерживая реле в сработавшем состоянии до тех пор, пока ток в обмотке не снизится до значения $I_{роз}$. Чем больше емкость C , тем больше замедлится действие реле.

Недостатком замедленных реле является значительный разброс их времени действия, в частности за счет колебания уровня напряжения источника оперативного тока.

2-6. УКАЗАТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

Указательные реле служат для фиксации действия защиты в целом или каких-либо ее элементов. На рис. 2-20 показано указательное реле I , сигнализирующее действие защиты на отключение выключателя. При срабатывании защиты по обмотке реле I проходит ток, приводящий реле I в действие.

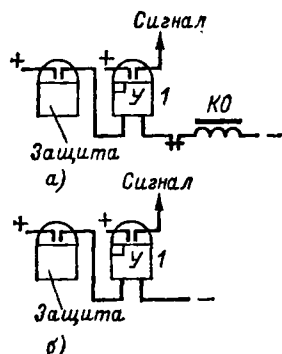


Рис. 2-20. Схемы включения указательных реле.

а — последовательного; б — параллельного.

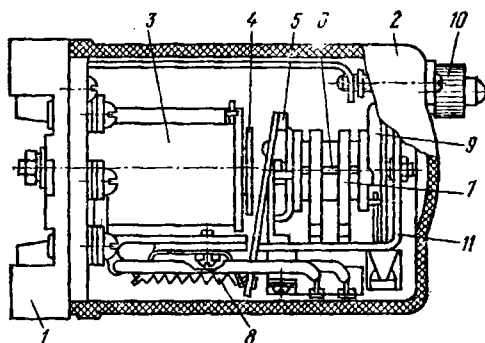


Рис. 2-21. Конструкция указательного реле типа РУ-21.

1 — цоколь; 2 — кожух; 3 — катушка; 4 — сердечник; 5 — якорь; 6 — контактный мостик; 7 — контактные пластины; 8 — возвратная пружина; 9 — флажок; 10 — кнопка возврата; 11 — скоба.

Ввиду кратковременности прохождения тока в обмотке указательных реле они выполняются так, что сигнальный флажок и контакты реле остаются в сработавшем состоянии до тех пор, пока их не возвратит на место обслуживающий персонал.

Указанные реле изготавливаются для последовательного (рис. 2-20, а) и параллельного (рис. 2-20, б) включения. Реле последовательного включения более удобны и поэтому имеют весьма широкое применение. Общий вид указательного реле типа РУ-21 приведен на рис. 2-21.

При появлении тока в обмотке 3 якорь реле 5 притягивается и освобождает флажок 9. Последний падает под действием собственного веса, принимая вертикальное положение. В этом положении флажок виден через прозрачный кожух 2. Возврат флажка в начальное положение производится кнопкой 10.

2.7. РЕЛЕ ВРЕМЕНИ

а) Назначение и основные требования

Реле времени служит для искусственного замедления действия устройств релейной защиты и электроавтоматики.

На схеме рис. 2-22 показано применение реле времени в защите. При замыкании контактов токового реле 1 плюс оперативного тока подводится к обмотке реле времени 2, которое спустя определенный интервал времени замыкает контакты и производит отключение выключателя. Время, проходящее с момента подачи напряжения на обмотку реле времени до замыкания его контактов, называется **в ы д е р ж к о й** **в р е м е н и** **р е л е**.

Основным требованием, предъявляемым к реле времени, применяемым в схемах релейной защиты, является **т о ч н о с т ь**. Погрешность во времени действия реле не должна превосходить $\pm 0,25$ с, а в ряде случаев $\pm 0,06$ с. В схемах сигнализации и некоторых устройствах автоматики допускается меньшая точность работы реле времени.

Реле времени должно надежно срабатывать начиная с 80 % номинального напряжения, и его выдержка времени не должна зависеть от возможных в эксплуатации колебаний оперативного напряжения. Потребление обмотки современных реле времени колеблется от 20 до 30 Вт.

Для быстрой готовности к повторному действию реле времени должно иметь мгновенный возврат после отключения его катушки от источника оперативного тока.

б) Конструкции реле времени

Реле времени имеют много конструктивных разновидностей, но принципы их устройства однородны и могут быть рассмотрены на примере конструкции, изображенной на рис. 2-23.

При появлении тока в обмотке 1 якорь 2 мгновенно втягивается, освобождая рычаг 4 с зубчатым сегментом 5. Под действием ведущей пружины 6 рычаг 4 приходит в движение, которое, однако, не является свободным, так как оно замедляется специальным устройством выдержки времени 7. Через некоторое

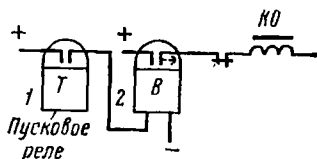


Рис. 2-22. Схема включения реле времени.

время t_p , зависящее от расстояния l (или угла α) и скорости движения ω_p рычага 4, последний переместится на угол α и замкнет контакты реле 8. Таким образом реле сработает с выдержкой времени $t_p = \alpha/\omega_p$.

Устройство выдержки времени может выполняться различными способами; в современных

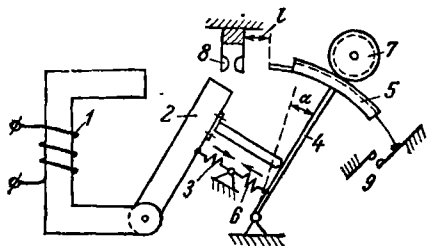


Рис. 2-23. Принцип устройства реле времени.

отечественных конструкциях оно осуществляется с помощью часового механизма, основным элементом которого является анкерное устройство.

При исчезновении тока в реле якорь и рычаг 4 должны мгновенно возвратиться в начальное положение под действием возвратной пружины 3. Это обеспечивается с помощью храпового механизма или фрикционного устройства, обладающих свободным расцеплением при обратном ходе сегмента 5.

Регулирование выдержки времени осуществляется изменением угла α путем перемещения контактов реле 8. В некоторых конструкциях предусматривается мгновенный контакт 9, позволяющий замыкать цепь с малой, обычно нерегулируемой выдержкой времени (около 0,15—0,2 с).

Для уменьшения размеров реле катушка реле времени не рассчитывается на длительное прохождение тока. Поэтому реле, предназначенные для длительного включения под напряжение, выполняются с добавочным сопротивлением r_d , включаемым последовательно с обмоткой реле, как показано на рис. 2-24. Нормально сопротивление r_d зашунтировано размыкающим мгновенным контактом реле. После срабатывания реле этот контакт размыкается и сопротивление r_d входит в цепь реле, ограничивая проходящий в ней ток до величины, допустимой по условиям нагрева и достаточной для удержания реле в сработавшем состоянии.

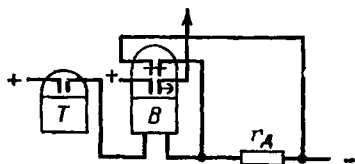


Рис. 2-24. Термически устойчивое реле времени.

Отечественные заводы выпускают реле постоянного тока типов ЭВ-110, ЭВ-120, ЭВ-130, ЭВ-140 и переменного тока ЭВ-210, ЭВ-220, ЭВ-230, ЭВ-240 [Л. 10, 101]. Устройство этих реле показано на рис. 2-25, а.

В этой конструкции роль рычага 4 (рис. 2-23) выполняет сектор 10, приводимый в движение ведущей пружиной 11. Сектор 10 через ведущее зубчатое колесо 13 приводит в движение подвижный контакт реле 22 и фрикционное сцепление 14, показанное отдельно

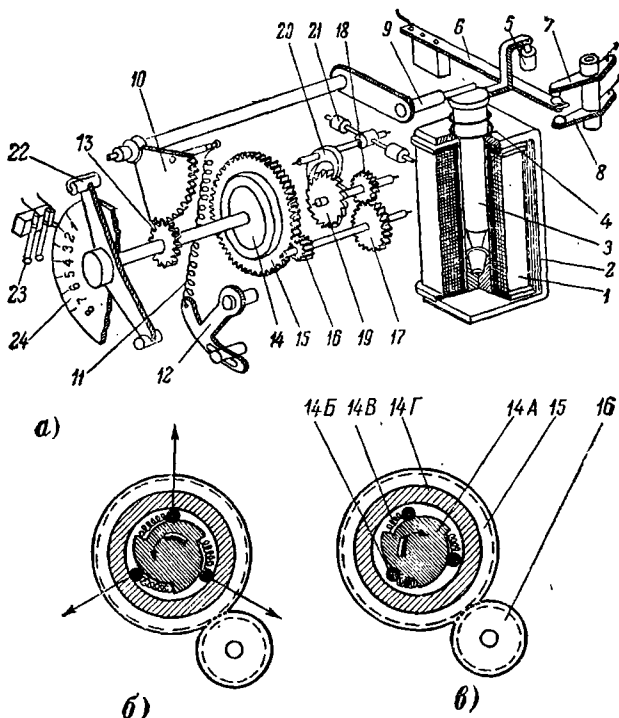


Рис. 2-25. Кинематическая схема реле времени типа ЭВ-110 (ЭВ-130) Чебоксарского электроаппаратного завода.

1 — обмотка; 2 — магнитопровод; 3 — якорь; 4 — возвратная пружина; 5 — поронок; 6 — подвижный мгновенный контакт; 7 и 8 — неподвижные мгновенные контакты; 9 — палец; 10 — зубчатый сектор; 11 — ведущая пружина; 12 — скоба для изменения натяжения пружины; 13 — зубчатое колесо; 14 — Фрикционное сцепление (14А — звездочка; 14Б — шарик; 14В — пружина; 14Г — обойма); 15 — ведущее зубчатое колесо; 16 — трибка часового механизма; 17 и 18 — промежуточные зубчатые колеса часового механизма; 19 — анкерное зубчатое колесо; 20 — анкерная скоба; 21 — грузики; 22 — подвижный контакт; 23 — неподвижный контакт; 24 — шкала.

на рис. 2-25, б и в. Фрикционное сцепление связывает подвижную систему реле с часовым механизмом. Через зубчатые колеса 15, 16, 17 и 18 движение передается на анкерное колесо 19. Скорость вращения последнего ограничивается колебательным движением анкерной скобы 20, которое зависит от ее момента инерции, определяемого грузиками 21. Выдержка времени изменяется положением неподвижного контакта 23.

Реле времени ЭВ-133 выполняются термически стойкими по схеме на рис. 2-24.

Кроме рассмотренных электромагнитных реле времени применяются реле времени, выполняемые с помощью синхронных микродвигателей, и реле с контуром из емкости и активного сопротивления (см. § 4-8 и 11-17, в).

2-8. ПОЛЯРИЗОВАННЫЕ РЕЛЕ

Поляризованные реле являются разновидностью электромагнитных конструкций. В отличие от рассмотренных выше электромагнитных реле якорь поляризованного реле находится под воздействием двух магнитных потоков, из которых один создается током, питающим обмотку реле, а второй — постоянным магнитом. Магнитный поток обмотки называется рабочим, а постоянного магнита — поляризующим. Поляризованные реле выполняются в двух вариантах: с дифференциальной магнитной системой и мостовой.

Обе конструкции состоят из сердечника 1, обмотки 2, постоянного магнита 3, якоря 4 и контактной системы 5 (рис. 2-26).

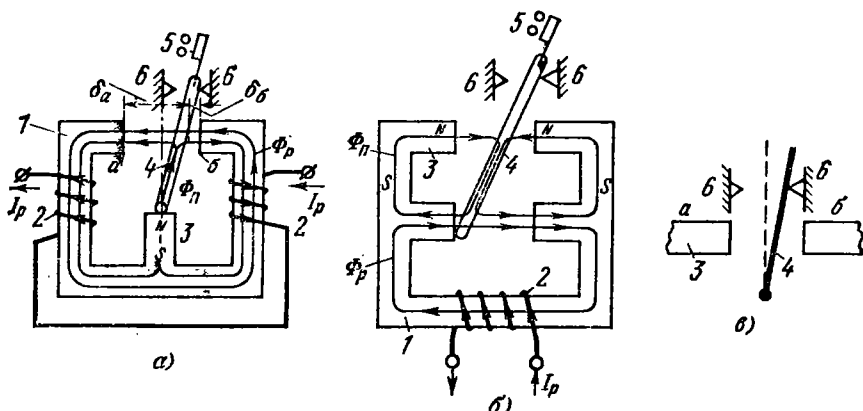


Рис. 2-26. Принцип устройства поляризованных реле.

а — с дифференциальной магнитной системой; б — с мостовой магнитной системой; « — «нейтральная» регулировка контактов.

Рассмотрим принцип действия реле на примере более простой дифференциальной системы (рис. 2-26). Поляризующий магнитный поток Φ_n постоянного магнита выходит из северного полюса N и разветвляется на две части Φ_{na} и Φ_{nb} , замыкающиеся через воздушные зазоры δ_a и δ_b и соответствующие половины сердечника 1. Обмотка 2, обтекаемая током I_p , создает рабочий магнитный поток Φ_p , который замыкается по сердечнику 1 и по воздушным зазорам δ_a и δ_b .

Для простоты рассмотрения часть магнитного потока, отвечающая через якорь, не учитывается. В воздушном зазоре δ_a магнитные потоки Φ_n и Φ_p суммируются, а в δ_b вычитаются, образуя результирующие магнитные потоки:

$$\dot{\Phi}_a = \dot{\Phi}_{na} + \dot{\Phi}_p \quad \text{и} \quad \dot{\Phi}_b = \dot{\Phi}_{nb} - \dot{\Phi}_p. \quad (2-15)$$

Под воздействием магнитного потока Φ_a якорь притягивается к левому полюсу a с силой $F_a = k\Phi_a^2$. Силе F_a противодействует

сила $F_\delta = k\Phi_\delta^2$, стремящаяся притянуть якорь к правому полюсу δ .

При определенном токе $I_p \geq I_{c.p}$ магнитный поток Φ_a становится больше магнитного потока Φ_δ , сила $F_a > F_\delta$ и якорь отклоняется влево, к полюсу a , замыкая контакты δ .

При изменении направления тока I_p поток Φ_p также меняет свое направление, вследствие чего в зазоре δ_a возникает разность магнитных потоков, а в зазоре δ_δ их сумма. Тогда при $I_p \geq I_{c.p}$ поток $\Phi_\delta > \Phi_a$, сила $F_\delta > F_a$ и якорь отклоняется вправо. Таким образом, благодаря наличию поляризующего потока реле становится направленным и реагирует не только на значение тока, но и на его направление (поляриность).

Аналогичным образом работает реле и с мостовой магнитной системой, приведенное на рис. 2-26, б.

При питании реле переменным током якорь реле вибрирует, следуя за изменением направления тока. По этой причине поляризованные реле не пригодны для работы на переменном токе.

Поляризованные реле могут выполняться с односторонним и двусторонним действием, с фиксацией и без фиксации начального положения якоря. Реле одностороннего действия с фиксацией начального положения якоря показано на рис. 2-26, а, б. У этого реле упоры δ , ограничивающие ход якоря, устанавливаются так, чтобы при любом положении якоря преобладало влияние одного из полюсов, например правого δ . Для этой цели зазор δ_a взят больше δ_δ . Тогда при отсутствии тока I_p поляризующий магнитный поток $\Phi_{пб} > \Phi_{па}$, соответственно сила $F_\delta > F_a$ и якорь реле прижимается к правому упору под действием преобладающей силы F_δ . При появлении $I_p > I_{c.p}$ якорь отклоняется влево, замыкая контакты реле. После исчезновения тока I_p якорь возвращается под действием поляризующего поля в начальное положение.

Такая регулировка называется настройкой с «преобладанием». Реле подобного типа наиболее часто применяется в схемах защиты.

Если упоры δ расположить симметрично по отношению к среднему положению якоря в зазоре (рис. 2-26, в), то такая регулировка называется нейтральной. В зависимости от направления I_p якорь отклоняется вправо или влево, замыкая соответствующие контакты реле. При исчезновении I_p якорь остается в том положении, в каком он находился при действии I_p . Следовательно, такое реле работает как реле двустороннего действия, но не имеет фиксированного начального положения якоря.

Поляризованные реле обладают важными преимуществами, к которым следует отнести: 1) высокую чувствительность и малое потребление, достигающее при минимальном токе срабатывания и зазоре между контактами около 0,5 мм, примерно 0,005 Вт; 2) высокую кратность тока термической стойкости, равную $(20 \div 50) I_{c.p.min}$, у обычных электромагнитных реле термическая кратность не превышает $1,5 I_{c.p.min}$; 3) быстроту действия, которая достигает 0,005 с.

Недостатками поляризованных реле являются: малая мощность контактов; небольшой зазор между ними, от 0,1 до 0,5 мм, и относительно невысокий коэффициент возврата.

Поляризованные реле применяются в схемах релейной защиты как вспомогательные реле постоянного тока при необходимости быстродействия и высокой чувствительности, а также в качестве реагирующих (исполнительных) органов в схемах реле на выпрямленном токе.

2-9. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ

а) Принцип действия

На рис. 2-27 показан принцип выполнения индукционных реле. Реле состоит из подвижной системы 3, расположенной в поле двух магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} . Магнитные потоки создаются токами, проходящими по обмоткам неподвижных электромагнитов 1 и 2. Подвижная система выполняется в виде медного или

алюминиевого диска или цилиндра (барабанчика), закрепленного на оси, которая может вращаться. При вращении против часовой стрелки подвижная система преодолевает момент пружины 5 и замыкает контакты 4.

Обмотки реле 1 и 2 питаются переменными (синусоидальными) токами I_1 и I_2 , которые создают переменные магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} , показанные на рис. 2-27. Пренебрегая потерями на намагничивание, считают, что потоки Φ_I и Φ_{II} совпадают по фазе с создающим их током, как изображено на векторной диаграмме (рис. 2-28).

Пронизывая подвижную систему 3, магнитный поток Φ_I наводит в ней э. д. с. $E_{д1} = -\frac{d\Phi_I}{dt}$, аналогично поток Φ_{II} создаст э. д. с. $E_{д2} = -\frac{d\Phi_{II}}{dt}$. Согласно

закону индукции наведенные э. д. с. отстают по фазе на 90° от вызвавших их магнитных потоков (рис. 2-28). Под действием э. д. с. $E_{д1}$ и $E_{д2}$ в подвижной системе возникают вихревые токи $I_{д1}$ и $I_{д2}$, замыкающиеся вокруг оси индуктирующего их магнитного потока. Положительные направления $I_{д1}$ и $I_{д2}$, определенные с помощью правила «буравчика» по положительному направлению потоков Φ_I и Φ_{II} , показаны на рис. 2-27. Вследствие малой величины

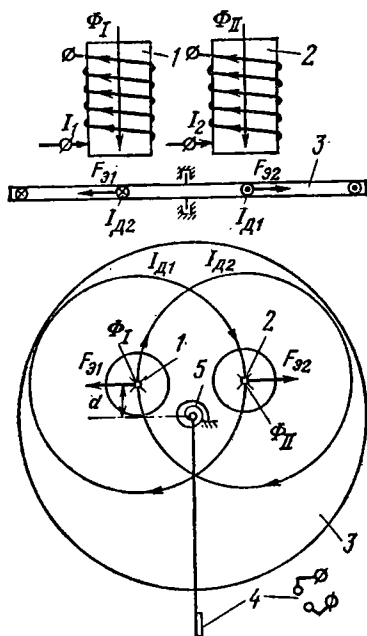


Рис. 2-27. Принцип устройства индукционного реле.

э. д. с. отстают по фазе на 90° от вызвавших их магнитных потоков (рис. 2-28). Под действием э. д. с. $E_{д1}$ и $E_{д2}$ в подвижной системе возникают вихревые токи $I_{д1}$ и $I_{д2}$, замыкающиеся вокруг оси индуктирующего их магнитного потока. Положительные направления $I_{д1}$ и $I_{д2}$, определенные с помощью правила «буравчика» по положительному направлению потоков Φ_I и Φ_{II} , показаны на рис. 2-27. Вследствие малой величины

индуктивного сопротивления контура вихревых токов они принимаются совпадающими по фазе с соответствующей э. д. с. (рис. 2-28).

Из теории электротехники известно, что между магнитным потоком и током, находящимся в его поле, возникают электромагнитные силы взаимодействия. В рассматриваемой конструкции возникают две силы: $F_{\partial 1}$, обусловленная взаимодействием магнитного потока Φ_I и тока $I_{д2}$, и $F_{\partial 2}$, вызванная взаимодействием Φ_{II} с $I_{д1}$ (рис. 2-27).

Как известно, сила взаимодействия между магнитным потоком и контуром тока, индуктированного этим потоком, равна нулю, при условии что магнитный поток создает равномерное магнитное поле. В индукционных реле это условие выполняется, и поэтому силы взаимодействия между Φ_I и $I_{д1}$ и Φ_{II} и $I_{д2}$ отсутствуют. Направление сил $F_{\partial 1}$ и $F_{\partial 2}$ для положительного значения потоков и токов определяется по правилу «левой руки» и показано на рис. 2-27. Можно доказать, что мгновенное значение сил $F_{\partial 1}$ и $F_{\partial 2}$ меняет свой знак в течение периода $T = 1/f$ 4 раза, поэтому поведение реле (вращение подвижной системы) зависит от знака среднего значения сил $F_{\partial 1}$ и $F_{\partial 2}$. Знак и направление каждой силы определяется углом сдвига фаз между магнитным потоком и взаимодействующим с ним током $I_{д}$. Силы $F_{\partial 1}$ и $F_{\partial 2}$ образуют результирующую электромагнитную силу F_{∂} , равную их алгебраической сумме $F_{\partial} = F_{\partial 1} + F_{\partial 2}$. Результирующая сила F_{∂} создает вращающий момент $M_{\partial} = F_{\partial}d$, где d — плечо силы F_{∂} . Электромагнитная сила и момент (F_{∂} и M_{∂}) приводят в движение подвижную систему 3, которая в зависимости от знака M_{∂} замыкает или размыкает контакты реле 4.

Из сказанного следует, что принцип работы индукционных реле основан на взаимодействии двух магнитных потоков с вихревыми токами, индуктируемыми в подвижной системе реле.

б) Электромагнитная сила и ее момент

Значение и знак электромагнитной силы F_{∂} выражаются через магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} , угол сдвига фаз между ними ψ и частоту переменного тока f уравнением

$$F_{\partial} = k' f \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-16)$$

Соответственно электромагнитный момент

$$M_{\partial} = F_{\partial} d = k'' f \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-17)$$

Вывод уравнений (2-16) и (2-17) приводится ниже.

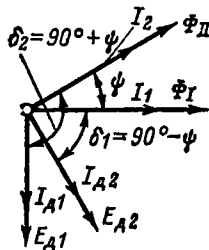


Рис. 2-28. Векторная диаграмма э. д. с., токов и магнитных потоков индукционного реле.

Среднее значение силы взаимодействия между магнитным потоком Φ и током I , находящимся в поле этого потока:

$$F_3 = k\Phi I \cos \delta, \quad (2-18)$$

где δ — угол сдвига фаз между потоком Φ и током I . Отсюда среднее значение силы:

$$F_{31} = k_1 \Phi_1 I_{d2} \cos \delta_1; \quad (2-19)$$

$$F_{32} = k_2 \Phi_{11} I_{d1} \cos \delta_2. \quad (2-20)$$

Как видно из векторной диаграммы (рис. 2-28), $\delta_1 = 90 - \psi$, $\delta_2 = 90 + \psi$. В соответствии с этим $\cos \delta_1 = \sin \psi$, а $\cos \delta_2 = -\sin \psi$.

Сделав соответствующую замену в выражениях (2-19) и (2-20), найдем среднее значение результирующей электромагнитной силы, действующей на подвижную систему реле:

$$F_3 = F_{31} + F_{32} = k_1 \Phi_1 I_{d2} \sin \psi + k_2 \Phi_{11} I_{d1} \sin \psi. \quad (2-21)$$

С учетом, что $I_{d1} \equiv \Phi_1$ и $I_{d2} \equiv \Phi_{11}$,

$$F_3 = k' \Phi_1 \Phi_{11} \sin \psi; \quad (2-22)$$

$$M_3 = k \Phi_1 \Phi_{11} \sin \psi, \quad (2-23)$$

где $k' = k_1 + k_2$; $k = k'd$ — постоянные величины, зависящие от размеров и материала (сопротивления r) диска, расположения полюсов относительно оси диска (плечо d) и частоты тока f .

Анализируя выражение электромагнитного момента (2-17), можно установить следующее:

1. Для получения электромагнитного момента конструкция реле должна обеспечивать создание не менее двух переменных магнитных потоков (Φ_1 и Φ_{11}), пронизывающих подвижную систему в разных точках и сдвинутых по фазе на угол $\psi \neq 0$.

2. Величина момента M_3 пропорциональна амплитудам магнитных потоков Φ_1 и Φ_{11} и их частоте f и зависит от сдвига фаз ψ между потоками.

Реле имеет наибольший момент при сдвиге фаз магнитных потоков на 90° . При $\psi = 0$ реле не может работать, так как $M_3 = 0$.

3. Знак момента зависит от $\sin \psi$. Иначе говоря, он зависит от сдвига фаз ψ между магнитными потоками Φ_1 и Φ_{11} или создающими их токами I_1 и I_2 . При значениях ψ в пределах от 0 до 180° момент M_3 положителен, при этом магнитный поток Φ_{11} опережает поток Φ_1 , а сила F_3 направлена от оси опережающего магнитного потока Φ_{11} к оси отстающего Φ_1 . При $-\psi$ в пределах от 180° до 360° момент M_3 отрицателен. В этом случае поток Φ_{11} отстает от Φ_1 , а сила F_3 направлена в обратную сторону — от оси Φ_1 к оси Φ_{11} . Таким образом, *результатирующая сила F_3 всегда направлена от оси опережающего к оси отстающего магнитного потока.*

4. На индукционном принципе могут выполняться только реле переменного тока. Это объясняется тем, что токи в диске или цилиндре индуктируются при условии, что электромагниты пи-

таются переменным током. Индукционный принцип получил весьма широкое распространение. На этом принципе выполняются реле тока, направления мощности и многие другие виды реле.

2-10. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

а) Реле с короткозамкнутыми витками (экранами)

Реле (рис. 2-29) имеет электромагнит 1, охватывающий своими полюсами укрепленный на оси диск 2. На верхнем и нижнем полюсах электромагнита насажены короткозамкнутые медные витки 3, охватывающие часть сечения полюсов. Токи в обмотке

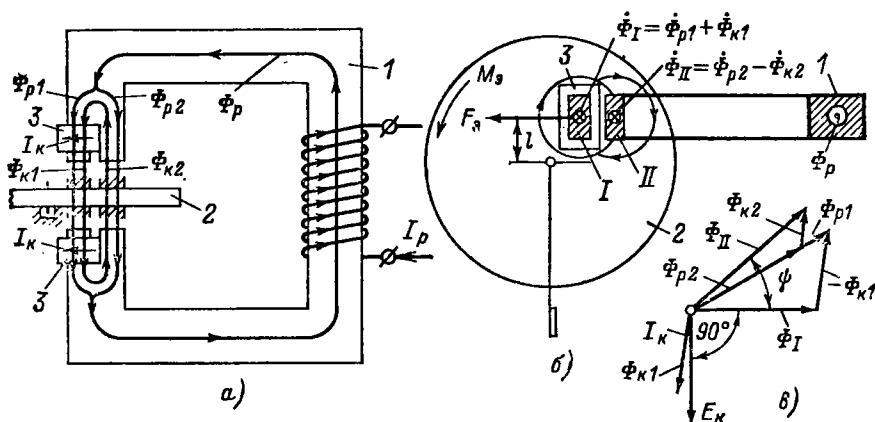


Рис. 2-29. Принцип устройства индукционного реле тока или напряжения с короткозамкнутыми витками.

а и б — принцип устройства; в — векторная диаграмма.

реле I_p и короткозамкнутом витке I_K создают магнитные потоки Φ_p и Φ_K , положительные направления которых показаны на рис. 2-29. Из-под сечения полюса I, охваченного короткозамкнутым витком, выходит результирующий магнитный поток $\Phi_I = \Phi_{p1} + \Phi_{K1}$. Из-под второй части полюса (сечение II) выходит магнитный поток $\Phi_{II} = \Phi_{p2} - \Phi_{K2}$. Оба магнитных потока пронизывают диск, индуцируя в нем вихревые токи.

Векторная диаграмма потоков показана на рис. 2-29, в. Она строится так же, как и для электромагнитных реле с короткозамкнутым витком (рис. 2-7).

Векторная диаграмма показывает, что магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} сдвинуты по фазе на угол ψ , причем Φ_{II} опережает Φ_I . Следовательно, конструкция с короткозамкнутым витком обеспечивает создание двух сдвинутых по фазе и смещенных в прост-

ранстве магнитных потоков за счет расщепления на две составляющие магнитного потока, создаваемого обмоткой реле. Взаимодействие магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} с индуцированными в диске токами создает электромагнитную силу F_3 и действующий на диск момент

$$M_3 = F_3 d = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-24)$$

Сила F_3 направлена всегда в сторону короткозамкнутого витка (от опережающего потока Φ_{II} к отстающему Φ_I).

Поскольку оба магнитных потока пропорциональны току I_p и угол ψ при изменении тока I_p остается неизменным, выражение (2-24) можно представить в виде

$$M_3 = k' I_p^3. \quad (2-25)$$

При питании обмотки реле током сети I_c ток I_p пропорционален последнему. Поэтому момент реле $M_3 = k I_c^3$, и, следовательно, реле является токовым. Если же обмотку реле выполнить с большим сопротивлением и питать напряжением сети U_c , то ток в обмотке реле $I_p = U_c / (n_n z_p)$, где n_n — коэффициент трансформатора напряжения; z_p — сопротивление обмотки реле.

Отсюда

$$M_3 = k U_c^3. \quad (2-26)$$

Поведение реле определяется напряжением сети U_c ; следовательно, такое реле является реле напряжения.

б) Время действия индукционных реле

Конструкция индукционных реле позволяет выполнять их с выдержкой времени без применения специальных часовых механизмов. Время действия индукционного реле зависит от угла α , на который должен повернуться диск для замыкания контактов K реле, и угловой скорости движения диска реле ω_p (рис. 2-30, а). Если допустить, что скорость постоянная, то $t_p = \alpha / \omega_p$.

Движение диска происходит под влиянием избыточного момента $M_{вр} = M_3 - M_c$, представляющего собой разность электромагнитного момента и противодействующего ему момента сопротивления M_c .

Составляющие момента сопротивления M_c показаны на рис. 2-30, а.

Момент вращения преодолевает момент инерции подвижной системы $J \frac{d\omega}{dt}$, сообщая ей ускорение $d\omega/dt$;

$$M_{вр} = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (2-27)$$

Чем больше избыточный момент $M_{вр}$, тем больше угловая скорость диска ω_p . С увеличением тока I_p в обмотке реле избыточный момент возрастает за счет увеличения электромагнитного

момента, который пропорционален I_p^2 . В результате этого возрастает скорость ω_p и соответственно уменьшается время действия реле t_p .

Таким образом, время действия индукционного реле является функцией тока: с увеличением тока время t_p уменьшается. Такая характеристика времени действия реле называется *зависимой* и изображена кривой 1 на рис. 2-30, б. На практике часто применяются токовые реле с ограниченно зависимой характеристикой выдержки времени, имеющей вид кривой 2 на рис. 2-30, б. Особенность этой характеристики состоит в том, что, начиная с некоторого значения тока в реле, время действия реле остается неизменным, т. е. не зависящим от тока. Эта часть характеристики называется *независимой*.

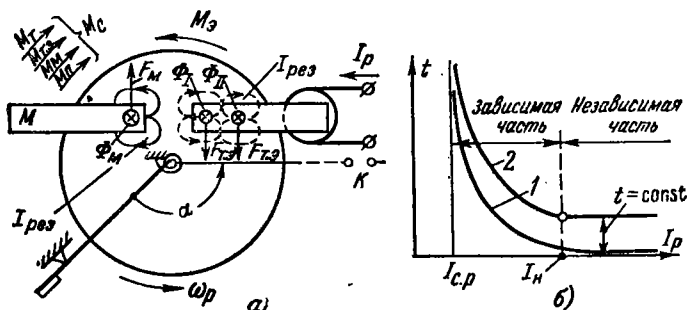


Рис. 2-30. Моменты, действующие на диск индукционного реле при его вращении (а), и характеристика реле $t = f(I_p)$ (б).

$M_{\text{п}}$ — момент пружины; $M_{\text{т}}$ — момент трения; $M_{\text{м}}$ — момент от токов «резания», наведенных потоком $\Phi_{\text{м}}$ постоянного магнита; $M_{\text{т.э}}$ — момент от токов «резания», наводимых потоками Φ_{I} и Φ_{II} .

Для получения ограниченно зависимой характеристики параметры реле подбираются так, чтобы при токе $I_{\text{н}}$ (токе насыщения), соответствующем началу независимой части характеристики, магнитопровод реле насыщался. При насыщении магнитопровода увеличение тока $I_p > I_{\text{н}}$ не вызывает увеличения магнитных потоков Φ_{I} и Φ_{II} , в результате чего избыточный момент и обусловленные им угловая скорость диска и выдержка времени остаются неизменными.

Для повышения выдержки времени индукционных реле устанавливается постоянный магнит M , охватывающий своими полюсами диск (рис. 2-30, а). При вращении диск пересекает силовые линии магнитного потока $\Phi_{\text{м}}$ постоянного магнита, в результате чего в нем наводятся токи «резания». От их взаимодействия с магнитным потоком $\Phi_{\text{м}}$ возникает момент

$$M_{\text{м}} = k\Phi_{\text{м}}^2\omega_p, \quad (2-28)$$

противодействующий движению диска. Момент $M_{\text{м}}$ уменьшает избыточный момент, за счет чего уменьшается скорость ω_p и возрастает выдержка времени t_p .

Аналогичное влияние на вращение диска оказывают моменты $M_{T.э1}$ и $M_{T.э2}$ от тока «резания», наводимых в диске основными магнитными потоками Φ_1 и Φ_{11} . Суммарный момент

$$M_{T.э} = M_{T.э1} + M_{T.э2}. \quad (2-29)$$

Моменты M_M и $M_{T.э}$ не влияют на условия срабатывания реле, так как в неподвижном диске токов «резания» не возникает, и поэтому моменты M_M и $M_{T.э}$ отсутствуют.

Время действия индукционных реле обычно регулируется изменением расстояния между подвижным и неподвижным контактами K .

Индукционные реле мгновенного действия выполняются без постоянных магнитов и с минимальным ходом подвижной системы. Кроме того, для повышения быстродействия реле принимаются меры к увеличению скорости движения подвижной системы. Из уравнения $M_{вр} = J \frac{d\omega}{dt}$ следует, что чем меньше момент инерции J , тем быстрее будет вращаться подвижная система реле. Поэтому вместо систем с диском, имеющих большой момент инерции за счет значительного диаметра, используются системы с цилиндрическим ротором, который имеет малый диаметр и поэтому его момент инерции значительно меньше момента инерции диска. Реле с цилиндрическим ротором могут действовать со временем около 0,02—0,04 с, а минимальное время действия реле с диском приближается к 0,1 с.

в) Характеристики моментов $M_э$ и M_n

Зависимость моментов от угла поворота диска представлена на рис. 2-31. При повороте диска в сторону замыкания контактов пружина закручивается

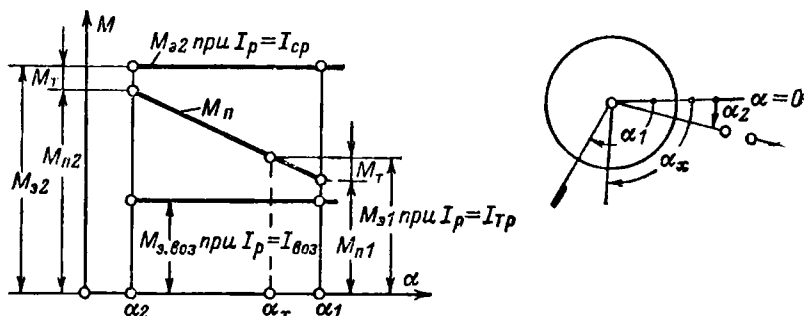


Рис. 2-31. Моменты, действующие на диск индукционного реле при срабатывании и возврате.

($I_{тр}$ — ток начала вращения диска, т. е. ток трогания).

и ее момент M_n нарастает; в то же время электромагнитный момент $M_э$ не зависит от угла поворота диска.

Это различие характеристик $M_э$ и M_n является недостатком индукционных конструкций, вызывающим: 1) ухудшение коэффициента возврата реле;

2) ослабленный нажим подвижных контактов реле на неподвижные при срабатывании реле; 3) зависимость начального положения подвижной системы реле от величины проходящего в нем тока в нормальном режиме, что приводит к произвольному изменению выдержки времени реле.

Поэтому во всех конструкциях индукционных реле с выдержкой времени (имеющих большой угол поворота α) предусматриваются специальные меры для устранения перечисленных выше дефектов.

У реле мгновенного действия угол α мал и в результате этого отмеченные дефекты не проявляются.

г) Инерционный выбег

Вращающийся диск индукционного реле после прекращения действия электромагнитной силы продолжает свое движение по инерции за счет накопленной кинетической энергии. Инерционный выбег диска может привести к замыканию по инерции контактов реле после отключения к. з. в сети. Для уменьшения выбега диска используется постоянный магнит M (рис. 2-30, а). Эта мера снижает, но не исключает полностью инерционный выбег реле. Поэтому во избежание ложного действия защиты с такими реле ступень селективности при выборе выдержки времени увеличивается на величину инерционной ошибки (см. § 4-6, а).

2-11. ТОКОВОЕ ИНДУКЦИОННОЕ РЕЛЕ СЕРИИ РТ-80 И РТ-90

Отечественная промышленность выпускает токовые реле серии РТ-80 и РТ-90 (рис. 2-32). Реле состоит из двух элементов: индукционного с ограниченно зависимой характеристикой времени действия и электромагнитного — действующего мгновенно и называемого отсечкой.

Совместная работа обоих элементов позволяет получить характеристику выдержки времени, показанную на рис. 2-33, весьма удобную в эксплуатации. При токах больше тока срабатывания электромагнитного элемента $I_{a.c.p}$ реле работает без выдержки времени, отсекая характеристику индукционного элемента. При токах, меньших $I_{a.c.p}$, работает индукционный элемент реле с ограниченной зависимой выдержкой времени.

Реле РТ-80 и РТ-90 имеют одинаковую конструкцию. Они различаются характеристикой времени действия. Независимая часть характеристики у РТ-90 начинается при меньших кратностях тока, чем у реле РТ-80.

Индукционный элемент реле. Индукционный элемент имеет электромагнит 1 с короткозамкнутыми витками 2. При появлении тока в обмотке 19 возникает электромагнитная сила F_3 , действующая на диск 3, который вращается на оси в подшипниках, установленных на подвижной рамке 4. Рамка 4 имеет свою ось вращения 18, укрепленную на корпусе реле. Пружина 5 притягивает рамку к упору 17. На оси диска насажен червяк 7, вращающийся вместе с осью и диском. Червяк 7 и зубчатый сегмент 8, управляющий работой контактов реле 12, нормально расцеплены. Для действия реле необходимо, чтобы червяк сцепился с зубчатым сегментом и поднял его до замы-

кания контактов реле. Электромагнитной силе F_3 (рис. 2-32, б) противодействует сила F_{Π} пружины 5. При токе в реле, равном 20—30% тока срабатывания индукционного элемента $I_{и.с.р.}$, под влиянием силы F_3 диск начинает вращаться. При этом в диске наводятся токи «резания», которые во взаимодействии с магнитным потоком постоянного магнита 6 создают силу F_M , препятствующую вращению диска. При токе в реле $I_p > I_{и.с.р.}$ сумма электромагнитных моментов M_3 и M_M , создаваемых соответственно F_3 и F_M , преодолевает момент пружины, и рамка перемещается, сцепляя червяк 7

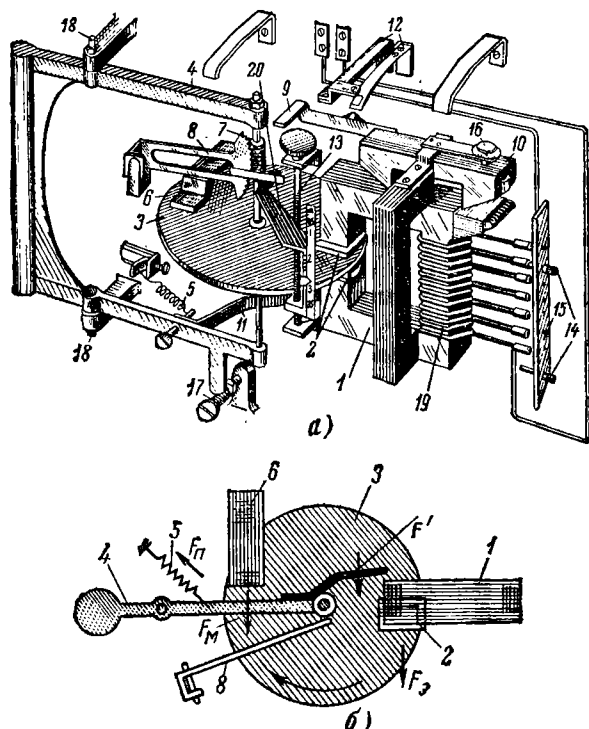


Рис. 2-32. Токовое реле типа РТ-80 и РТ-90.

а — конструкция реле; б — силы, действующие на диск подвижной рамки.

с зубчатым сегментом 8. Увеличение момента пружины 5 компенсируется нарастанием дополнительной силы F' (рис. 2-32, б), притягивающей специальную стальную скобу 11 к электромагниту 1. Сила F' , притягивающая скобу 11, обеспечивает также избыточное усилие, надежно сцепляющее червяк с сегментом.

После сцепления червяка с сегментом движение рамки прекращается, но диск продолжает вращаться и посредством червяка 7 поднимает сегмент 8. Рычаг сегмента 8 поднимает коромысло 9, замыкая при этом контакты реле 12. Вследствие уменьшения зазора якорь 10 притягивается к электромагниту 1, обеспечивая плотное замыкание контактов 12. При токе в реле, меньшем тока возврата, момент пружины 5 преодолевает электромагнитный момент и рамка возвращается в начальное положение, расцепляя червяк с сегментом. Сегмент падает на упор 20, размыкая контакты реле.

Ток срабатывания регулируется изменением числа витков обмотки реле 19 при помощи штепселя 14, переставляемого в гнезда планки 15. Время действия реле регулируется изменением начального положения сегмента 8 винтом 13. Особенностью реле является описанное сцепление червяка с сегментом, дающее следующие положительные качества:

а) Устраняются недостатки, обусловливаемые различием характеристик моментов $M_э$ и M_p .

б) Уменьшается инерционный выбег реле, так как после исчезновения тока червяк быстро расцепляется с сегментом и вращение диска по инерции не может привести к замыканию контактов реле.

в) Контакты реле замыкаются весьма надежно под влиянием силы, притягивающей якорь 10 электромагнитного элемента.

Электромагнитный элемент (отсечка). На якорь электромагнитного элемента действуют потоки рассеяния электромагнита 1. При токах, превышающих ток срабатывания индукционного элемента в 4—8 раз, коромысло притягивается и мгновенно замыкает контакты реле 12. Ток срабатывания электромагнитного элемента регулируется винтом 16, меняющим воздушный зазор между якорем и электромагнитом.

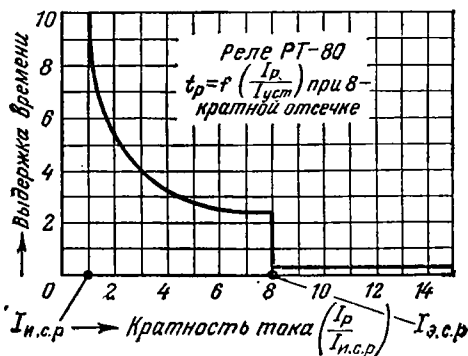


Рис. 2-33. Характеристика реле типа РТ-81.

2-12. ИНДУКЦИОННЫЕ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

а) Назначение и требования к реле

Реле направления мощности реагируют на значение и знак мощности, подведенной к их зажимам. Они используются в схемах защит как орган, определяющий по направлению (знаку)

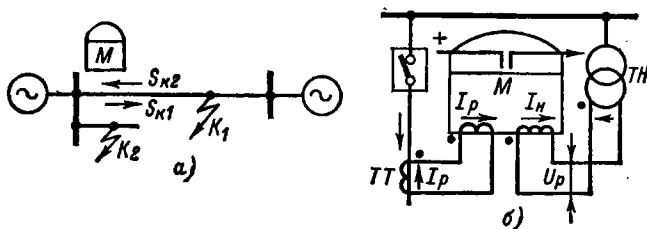


Рис. 2-34. Реле направления мощности.

а — принцип действия; б — схема включения.

мощности (протекающей по защищаемой линии), где произошло повреждение — на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин подстанции (рис. 2-34, а). В первом случае при к. з. в K_1 мощность к. з. S_{K1} направлена от шин в ли-

нию и реле направления мощности должно замыкать свои контакты, во втором при к. з. в K_2 — мощность к. з. S_{K_2} направлена к шпнам, в этом случае реле не должно замыкать контакты.

Реле мощности имеет две обмотки: одна питается напряжением U_p , а другая — током сети I_p (рис. 2-34, б). Взаимодействие токов, проходящих по обмоткам, создает электромагнитный момент, значение и знак которого зависит от напряжения U_p , тока I_p и угла сдвига φ_p между ними.

Реле направления мощности применяются в направленных защитах (см. гл. 7). Они должны обладать высокой чувствительностью, так как при к. з. вблизи места установки защиты напряжения U_p резко снижается, достигая в пределе нуля; при этом мощность, подводимая к реле, оказывается очень малой и при недостаточной чувствительности реле может не сработать, т. е. может иметь «мертвую» зону.

Чувствительность реле оценивается минимальной мощностью, при которой реле замыкает свои контакты. Эта мощность называется мощностью срабатывания и обозначается $S_{с.р.}$

Реле направления мощности выполняются мгновенными, поскольку они могут применяться в защитах, работающих без выдержки времени. Собственное время реле направления мощности должно быть минимальным, что особенно важно для реле, применяемых в схемах быстродействующих защит.

б) Конструкция и принципы действия индукционных реле мощности

Современные конструкции индукционных реле мощности выполняются с подвижной системой в виде цилиндрического ротора (рис. 2-35, а) [Л. 12, 9].

Реле имеет замкнутый магнитопровод 1 с выступающими внутрь полюсами. Между полюсами установлен стальной цилиндр (сердечник) 2, повышающий магнитную проницаемость между полюсного пространства. Алюминиевый цилиндр (ротор) 3 может вращаться в зазоре между стальным сердечником и полюсами. При вращении ротора 3 происходит замыкание контактов реле 6.

Для возврата ротора и контактов в исходное поло-

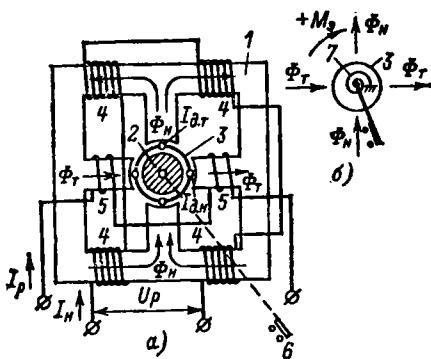


Рис. 2-35. Реле мощности.

а — с цилиндрическим ротором; б — ротор реле и направление положительного момента M_3 .

жение предусматривается спиральная противодействующая пружина 7 (рис. 2-35, б).

Обмотка 4 питается напряжением $U_p = U_c/n_n$, а обмотка 5 — током $I_p = I_c/n_n$, где U_c и I_c — напряжение и ток сети (защищаемого элемента). Ток $I_n = U_p/z_n$ в обмотке 4 создает магнитный поток Φ_n (полярный).

Ток I_p , проходящий по обмотке 5, в свою очередь создает магнитный поток Φ_t (рабочий) *.

На рис. 2-36 изображена векторная диаграмма магнитных потоков Φ_n и Φ_t . За исходный для ее построения принимается вектор напряжения U_p . Ток I_n сдвинут по фазе относительно напряжения U_p на угол α , а ток I_p — на угол φ_p .

Угол α определяется индуктивным и активным сопротивлением обмотки 4, питаемой напряжением, и называется углом внутреннего сдвига реле. Угол φ_p зависит от внешних параметров сети и схемы присоединения реле.

Магнитные потоки Φ_n и Φ_t изображены на диаграмме совпадающими с создающими их токами I_n и I_p .

Из векторной диаграммы следует, что поток Φ_n и Φ_t , а также и токи I_n и I_p сдвинуты по фазе на угол $\psi = \alpha - \varphi_p$ и что угол ψ меняется с изменением φ_p .

Магнитные потоки Φ_n и Φ_t пронизывают подвижную систему реле и наводят в ней вихревые токи $I_{дн}$ и $I_{дт}$ (рис. 2-35, а).

Взаимодействие вихревых токов с магнитными потоками создает электромагнитный момент $M_э$. Согласно формуле (2-23)

$$M_э = k\Phi_n\Phi_t \sin \psi. \quad (2-30)$$

Имея в виду, что $\Phi_n \equiv I_n \equiv U_n$, $\Phi_t \equiv I_p$, а $\psi = \alpha - \varphi_p$, получаем:

$$M_э = k_1 U_p I_p \sin (\alpha - \varphi_p) = k_1 S_p, \quad (2-31)$$

где $S_p = U_p I_p \sin (\alpha - \varphi_p)$ — мощность, подведенная к реле.

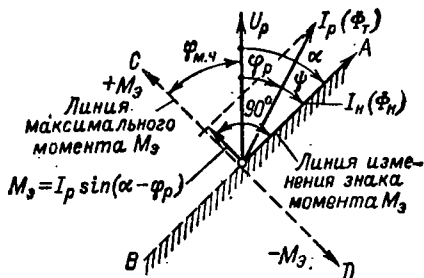


Рис. 2-36. Векторная диаграмма реле мощности.

* По аналогии с поляризованным реле, у которого рабочий магнитный поток может менять знак, а поляризующий имеет неизменное направление, обмотка напряжения и магнитный поток Φ_n в реле мощности называются поляризующими, а токовая обмотка и магнитный поток Φ_t — рабочими.

Анализируя выражение (2-31), можно сделать следующие выводы:

1. Электромагнитный момент реле пропорционален мощности S_p на зажимах реле и направлен от оси опережающего магнитного потока к оси отстающего.

2. Знак электромагнитного момента реле определяется знаком $\sin(\alpha - \varphi_p)$ и зависит от значения φ_p .

Синус, а следовательно, и M_Φ положительны, когда угол $\psi = \alpha - \varphi_p$ находится в пределах от 0 до 180° , и отрицательны, если ψ меняется от 180 до 360° . Это иллюстрируется рис. 2-36, где зона отрицательных моментов заштрихована.

За положительное направление момента M_Φ на рис. 2-35, б принято действие M_Φ по часовой стрелке — на замыкание контактов.

Незаштрихованная часть диаграммы на рис. 2-36 соответствует области положительных моментов, где Φ_T опережает Φ_H , а ψ и его синус имеют положительный знак.

Линия AB , проходящая через углы $\alpha - \varphi_p = 0$ и 180° , называется линией изменения знака в моменте. Она всегда расположена под углом α к вектору $\vec{U}_p$, т. е. совпадает с направлением вектора $\vec{I}_H$.

Из сказанного следует, что при Φ_T , опережающем поток Φ_H , момент M_Φ положителен, а при отстающем — отрицателен.

Линия CD (перпендикулярная AB) называется линией максимальных моментов в M_Φ . Проекция I_p на CD (рис. 2-36) равна $I_p \sin(\alpha - \varphi_p)$ и при I_p и U_p — пост. характеризует зависимость величины и знака момента M_Φ от угла φ_p . Момент M_Φ достигает максимума при $\alpha - \varphi_p = 90^\circ$, т. е. когда I_p опережает I_H на 90° . Угол φ_p , при котором M_Φ достигает максимального значения, называется углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч}$. Так как углы α и $\varphi_{м.ч}$ откладываются от вектора U_p в противоположные стороны, то их сумма, как это следует из рис. 2-36, $-\varphi_{м.ч} + \alpha = 90^\circ$, откуда $\varphi_{м.ч} = \alpha - 90^\circ$.

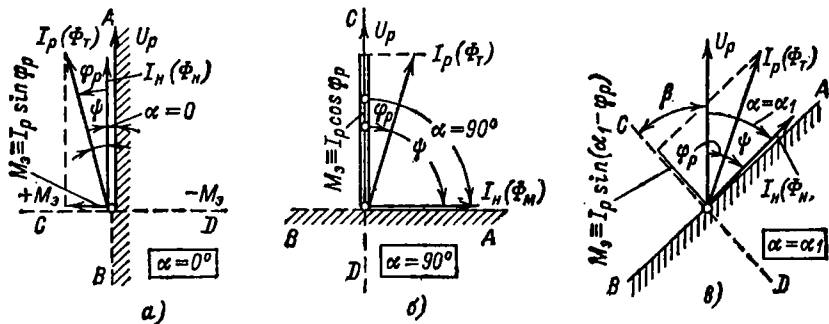


Рис. 2-37. Векторные диаграммы реле мощности разных типов.

α — синусного; β — косинусного; ϵ — смешанного.

3. Реле не действует, если отсутствует напряжение или ток в реле или если

$$\sin(\alpha - \varphi_p) = 0.$$

Последнее условие имеет место при $\varphi_p = \alpha$ и $\varphi_p = \alpha + 180^\circ$.

Таким образом, выражение (2-31) показывает, что рассмотренная конструкция есть реле, реагирующее на величину и знак мощности.

в) Три типа реле мощности

Изменяя величину угла внутреннего сдвига реле α , можно получить три типа реле мощности, различающихся характером зависимости M_a от φ_p , как это следует из выражения (2-3):

1. При $\alpha = 0$

$$M_a = k_1 U_p I_p \sin \varphi_p, \quad (2-32)$$

т. е. момент M_a реле пропорционален реактивной мощности, измеренной на зажимах реле. Такие реле называются синусными, или реле реактивной мощности. Реле имеет максимальный вращающий момент при $\varphi_p = 90^\circ$, при $\varphi_p = 0$ момент M_a равен нулю. Зоны положительных и отрицательных вращающих моментов и линия изменения знака моментов реле (AB) изображены на рис. 2-37, а.

2. При $\alpha = 90^\circ$

$$M_a = k U_p I_p \sin(90^\circ - \varphi_p) = k U_p I_p \cos \varphi_p, \quad (2-33)$$

т. е. момент реле пропорционален активной мощности, подводимой к реле. Поэтому такие реле называются реле активной мощности, или косинусными. Диаграмма знаков момента данного типа реле изображена на рис. 2-37, б.

3. При промежуточном значении угла $\alpha = \alpha_1$, где α_1 отличается от 0, но меньше 90° ,

$$M_a = k U_p I_p \sin(\alpha_1 - \varphi_p). \quad (2-34)$$

Такое реле, реагирующее на некоторую долю активной и реактивной составляющих мощности, называется реле смешанного типа. Если выразить α через дополняющий его угол β , т. е. представить его как $\alpha = 90^\circ - \beta$, то выражение момента примет вид:

$$M_a = k U_p I_p \sin(90^\circ - \beta - \varphi_p) = k U_p I_p \cos(\varphi_p + \beta). \quad (2-35)$$

Этим выражением часто пользуются на практике. Зона отрицательных и положительных моментов для реле смешанного типа показана на рис. 2-37, в. Каждый из трех рассмотренных типов реле мощности находит применение в схемах релейной защиты.

г) Основные характеристики реле мощности

Мощность срабатывания. Срабатывание реле происходит при условии, что электромагнитный момент M_z преодолевает сопротивление пружины M_p и трения M_T . Наименьшая мощность на зажимах реле, при которой оно срабатывает, называется мощностью срабатывания $S_{с.р.}$

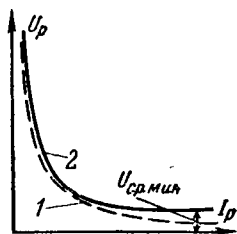


Рис. 2-38. Характеристика чувствительности реле мощности.

1 — теоретическая; 2 — действительная.

У современных индукционных реле направления мощности мощность срабатывания при угле максимальной чувствительности колеблется от 0,2 до 4 В·А.

Зависимость мощности срабатывания от тока I_p и угла φ_p принято оценивать характеристикой чувствительности и угловой характеристикой.

Характеристика чувствительности представляет собой зависимость $U_{с.р.} = f(I_p)$ при неизменном φ_p (рис. 2-38), где $U_{с.р.}$ — наименьшее напряжение, необходимое для действия реле (при данных значениях I_p и φ_p).

Обычно характеристика снимается при φ_p , равном углу максимальной чувствительности, т. е. для случая, когда

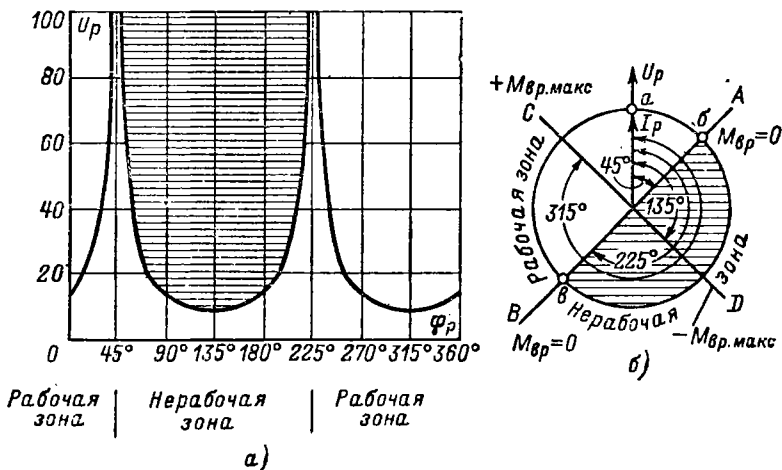


Рис. 2-39. Угловые характеристики реле мощности смешанного типа при $\alpha = 45^\circ$.

$\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$. Теоретическая характеристика чувствительности [см. формулу (2-31)] изображается гиперболой (кривая 1). В действительности же за счет насыщения стали магнитопровода при больших токах I_p напряжение $U_{с.р.}$ остается неизменным и кривая чувствительности идет параллельно оси токов (кривая 2).

Угловая характеристика представляет собой зависимость $U_{с.р} = f(\varphi_p)$ при неизменном значении I_p . Эта зависимость может быть получена из выражения (2-31), если в него подставить надлежащие значения I_p и α .

На рис. 2-39 показаны характеристики для реле смешанного типа с $\alpha = +45^\circ$. Угловая характеристика (рис. 2-39, а) позволяет определить:

а) изменение чувствительности реле (характеризуемое величиной $U_{с.р.}$) при разных значениях угла φ_p ;

б) минимальную величину $U_{с.р. \text{ мин}}$ и наиболее выгодную зону углов φ_p , в пределах которой $U_{с.р.}$ близко к $U_{с.р. \text{ мин}}$;

в) при каких углах φ_p меняется знак электромагнитного момента и пределы углов φ_p , которым соответствуют положительные и отрицательные моменты (рис. 2-39, б).

Время действия реле мощности зависит от величины мощности на зажимах реле, характеризуемой отношением $S_p/S_{с.р.}$. Характер этой зависимости приведен на рис. 2-40. При мощностях S_p , близких к $S_{с.р.}$, выдержки времени достаточно велики, и только при $S_p/S_{с.р.} \geq 3 \div 4$ реле работает с минимальным временем.

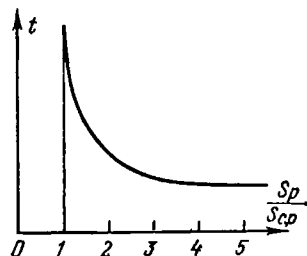


Рис. 2-40. Характеристика времени действия реле мощности $t = f\left(\frac{S_p}{S_{с.р.}}\right)$.

д) Полярность обмоток

Знак электромагнитного момента реле зависит от относительного направления токов I_p и I_n в его обмотках (или их магнитных потоков). Условились изготавливать реле направления мощности так, что при одинаковом направлении токов в обмотках напряжения и тока реле замыкает свои контакты (рис. 2-34). Одинаковым называется направление тока в обеих обмотках от начала к концу обмотки или наоборот. Заводы, изготавливающие реле, указывают однополярные зажимы обмоток, отмечая их условным знаком. На рис. 2-34 начало обмоток отмечено точками.

Реле подключается к измерительным трансформаторам с учетом полярности обмоток так, чтобы при к. з. в зоне защиты реле замыкало свои контакты.

е) Явление самохода

Самоходом называют срабатывание реле мощности при прохождении тока только в одной его обмотке — токовой или напряжения.

Реле, имеющее самоход от тока, может неправильно сработать при обратном направлении мощности, когда повреждение возникает в непосред-

ственной близости от реле, в результате чего напряжение на его зажимах будет равно нулю. В этом случае ток проходит только по токовой обмотке реле.

Причиной самохода обычно является несимметрия магнитных систем реле относительно цилиндрического ротора. В реле с цилиндрическим ротором для устранения самохода на стальном сердечнике 2 (рис. 2-35, а) предусмотрен срез; изменяя положения сердечника, можно компенсировать неравномерность потоков в воздушном зазоре.

ж) Индукционные реле мощности типа РБМ

Отечественной электропромышленностью выпускаются быстродействующие реле направления мощности РБМ, конструктивное выполнение которых соответствует показанному на рис. 2-35, а. Момент реле выражается уравнением

$$M_3 = kU_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = kU_p I_p \cos(\varphi_p + \beta).$$

Имеются два основных варианта исполнения реле [Л. 101]:

1) реле РБМ-171 и РБМ-271, используемые обычно для включения на фазный ток и междуфазное напряжение. Угол максимальной чувствительности у этих реле может изменяться и имеет два значения $\varphi_{м.ч} = -45^\circ$ и $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$.

2) реле РБМ-178, РБМ-278 и РБМ-177, РБМ-277 включаются на ток и напряжение нулевой последовательности; их угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = +70^\circ$. У реле РБМ-178, РБМ-278 $S_{с.р} = 0,2 \div 4 \text{ В} \cdot \text{А}$, у реле РБМ-177, РБМ-277 $S_{с.р} = 0,6 \div 3 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Реле РБМ-171, РБМ-177, РБМ-178 имеют по одному замыкающему контакту, а реле РБМ-271, РБМ-277, РБМ-278 — двустороннего действия и имеют два замыкающихся контакта двустороннего действия.

2-13. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Магнитоэлектрическое реле (рис. 2-41) состоит из постоянного магнита 1, подвижной рамки 2, на которой намотана обмотка 3, питающаяся током I_p , и контактов 4. Принцип работы магнитоэлектрических реле основан на взаимодействии тока I_p в обмотке рамки с магнитным потоком постоянного магнита Φ .

Сила, действующая на обмотку рамки, определяется по закону Био и Савара и равна:

$$F_3 = k B_m I_p l w_p, \quad (2-36)$$

где B_m — индукция магнитного поля постоянного магнита; I_p — ток в обмотке рамки; l — активная длина витка обмотки; w_p — число витков обмотки рамки.

Вращающий момент, образованный силами F_3 , равен:

$$M_3 = F_3 d = k' B_m I_p, \quad (2-36a)$$

где d — плечо пары сил F_3 ; $k' = k l w_p d$.

Угол поворота рамки принимается небольшим ($5-10^\circ$), а форма полюсов магнита подбирается таким образом, чтобы магнитное поле было равномерным. В этом случае магнитная индукция B_m является постоянной и, следовательно, момент M_3 можно считать пропорциональным току I_p в обмотке реле, т. е.

$$M_3 = k'' I_p. \quad (2-37)$$

Знак момента M_z и силы F_z зависит от направления тока I_p в подвижной рамке реле. При показанном на рис. 2-41 направлении I_p направление силы F_z определено с помощью правила «левой руки». При изменении направления I_p изменится и направление F_z .

Таким образом, магнитоэлектрические реле реагируют на направление тока и поэтому, так же как и поляризованные реле, не могут работать на переменном токе.

Магнитоэлектрические реле имеют высокую чувствительность и малое потребление. Мощность срабатывания достигает $10^{-8} - 10^{-10}$ Вт и превосходит чувствительность поляризованных реле, что объясняется наличием сильного поля постоянного магнита I .

Обладая малым потреблением, магнитоэлектрические реле имеют слабую контактную систему с малой отключающей способностью. Зазор между контактами очень мал — около 0,5—0,3 мм. Для повышения чувствительности противодействующая пружина в магнитоэлектрических реле имеет небольшой момент, поэтому магнитоэлектрические реле отличаются плохим возвратом. Надежный возврат этих реле часто обеспечивается подачей в обмотку реле тормозного тока, действующего на размыкания контактов. Время действия реле равно 0,1—0,2 с.

Указанные недостатки необходимо учитывать при использовании магнитоэлектрических реле в схемах защиты. Магнитоэлектрические реле широко применяются в качестве нуль-индикаторов в схемах на выпрямленном токе.

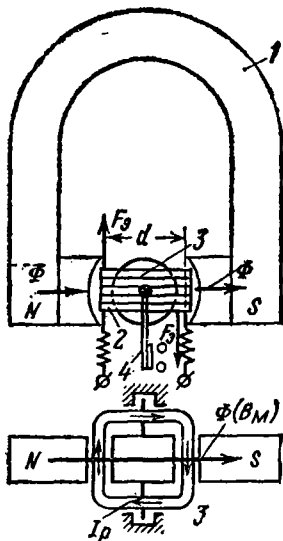


Рис. 2-41. Магнитоэлектрическое реле.

2-14. РЕЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Применение полупроводниковых приборов (диодов и триодов) [Л. 14, 15] позволяет уменьшить размеры реле, снизить потребление мощности от измерительных трансформаторов, повысить чувствительность, улучшить характеристики и выполнить реле без контактов и движущихся частей.

Полупроводниковые приборы имеют большие разбросы характеристик, зависимость параметров от температуры и нелинейность сопротивлений. Однако при учете этих недостатков в процессе конструирования их нежелательное влияние на параметры реле можно ограничить до допустимых пределов.

С использованием полупроводников могут выполняться как основные реле (т. е. реле тока, напряжения, мощности и сопротивления), так и элементы логической части схем защит.

Простые реле, реагирующие на одну электрическую величину — ток или напряжение, выполняются, как правило, на выпрямленном токе с помощью диодов. В качестве реагирующего (исполнительного) органа при этом используются высокочувствительные электромагнитные, поляризованные или магнитоэлектрические реле.

Более сложные реле, такие как реле мощности и сопротивления, реагирующие на две электрические величины — ток и напряжение, могут выполняться с использованием полупроводников на одном из следующих принципов [Л. 18, 17, 45, 87, 105]:

1) на сравнении абсолютных значений двух электрических величин $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$. Такие реле выполняются на выпрямленном токе: в них сравниваемые напряжения переменного тока $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ выпрямляются, а затем сопоставляются по величине с помощью специальных схем сравнения (фазочувствительных схем);

2) на сравнении фаз мгновенных значений двух электрических величин $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$. Реле такого типа выполняются с помощью фазосравнивающих схем, позволяющих определить сдвиг фаз между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

В обоих случаях сравниваемые величины U_I и U_{II} являются линейными функциями тока I_p и напряжения U_p подводимых к реле, а именно:

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p + k_2 \dot{I}_p \text{ и } \dot{U}_{II} = k_3 \dot{U}_p + k_4 \dot{I}_p, \quad (2-38)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 — постоянные коэффициенты, не зависящие от $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$.

Изменяя коэффициенты $k_1 — k_4$, можно получить реле разных типов и с различными характеристиками. К ним в первую очередь относятся реле направления мощности и реле сопротивления.

Полупроводниковые реле на сравнении абсолютных значений двух электрических величин, или, как их часто называют, реле на выпрямленном токе, разработаны в различных вариантах и получили широкое распространение.

Полупроводниковые реле на сравнении фаз разработаны в меньшей степени, но имеют определенную перспективу применения.

Ведутся также разработки реле на сравнении абсолютных значений и сравнении фаз с использованием эффекта Холла [Л. 13, 87, 17].

2-15. РЕЛЕ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ОДНУ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ ВЕЛИЧИНУ

К реле, реагирующим на одну электрическую величину, относятся реле тока и напряжения. Наибольшее распространение получили реле, включаемые на ток или напряжение сети через выпрямители, выполняемые с помощью полупроводниковых диодов.

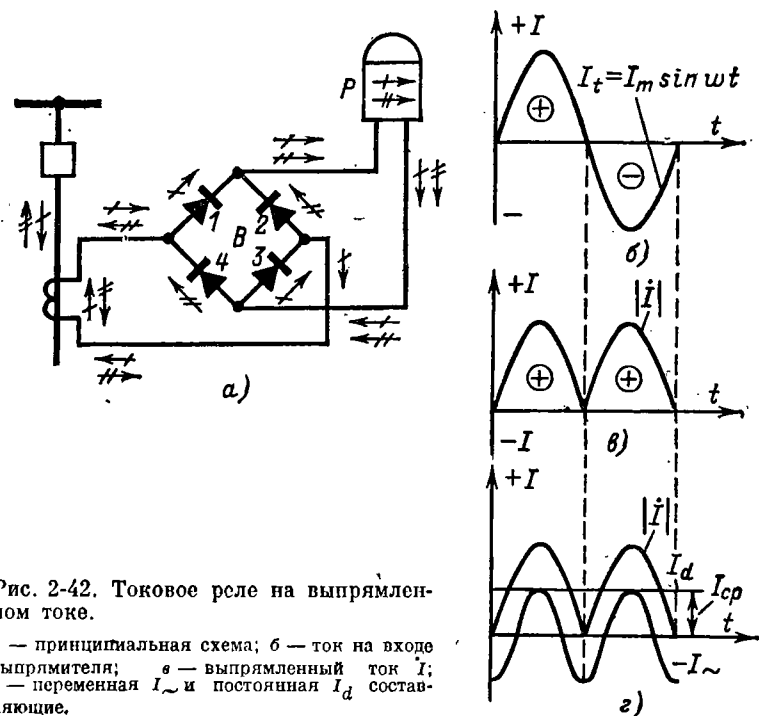


Рис. 2-42. Токовое реле на выпрямленном токе.

а — принципиальная схема; б — ток на входе выпрмителя; в — выпрямленный ток I_i ; г — переменная $I_{\sim}$ и постоянная I_d составляющие.

Устройство и принцип действия токового реле на выпрямленном токе показаны на рис. 2-42. Реле постоянного тока P электромагнитное, поляризованное или магнитоэлектрическое включается на ток сети через выпрямитель B на полупроводниковых диодах. Наилучшей схемой выпрямителя, широко применяемой в релейной технике, является двухполупериодная мостовая схема, приведенная на рис. 2-42, а.

Как следует из рис. 2-42, а, в положительный полупериод переменный ток $I_t = I_m \sin \omega t$, показанный стрелкой с одним штрихом, проходит через реле по двум открытым для положительного тока вентилям 1 и 3, при этом ventили 2 и 4 закрыты. В отрицательный полупериод ток I_t (стрелка с двумя штрихами) проходит в реле через ventили 2 и 4, которые в этом случае открываются, а ventили 1 и 3 закрываются.

Из показанного на рис. 2-42, а токораспределения видно, что ток после выпрямителя идет через реле все время в одном (положительном) направлении как в положительный, так и в отрицательный полупериод переменного тока.

Мгновенные значения выпрямленного тока пропорциональны соответствующим мгновенным значениям переменного тока, поэтому кривая выпрямленного тока $|I|$ имеет пульсирующий характер (рис. 2-42, в), изменяясь от нуля до максимума, но в отличие от кривой переменного тока она сохраняет постоянный знак.

Выпрямленный ток можно представить как сумму постоянной составляющей I_d , равной среднему значению выпрямленного тока, и переменной составляющей $I_{\sim}$, являющейся синусоидальной функцией с частотой 100 Гц (рис. 2-42, в).

Постоянная составляющая выпрямленного тока

$$I_d = \frac{2}{\pi} I_m = 0,63 I_m = I_{cp}, \quad (2-39)$$

где I_m — амплитуда выпрямляемого тока I ; I_{cp} — среднее значение выпрямленного тока.

Переменная составляющая

$$I_{\sim} = I_2 \cos 2\omega t = 0,425 I_m \cos 2\omega t. \quad (2-39a)$$

Из (2-39) следует, что постоянная слагающая I_d пропорциональна максимальному значению выпрямляемого тока I и может поэтому рассматриваться как модуль (абсолютная величина) его вектора, т. е. $I_d = k |I|$.

Разложение выпрямленного тока на составляющие осуществляется с помощью ряда Фурье [Л. 29 и 95], согласно которому выпрямленный ток $|I|$ состоит из постоянной слагающей и гармонических составляющих с нарастающей частотой и убывающими амплитудами.

При двухполупериодном выпрямлении синусоидального тока $i = I_m \times \sin \omega t$ [см. Л. 29 и 95] переменные слагающие ряда Фурье состоят только из четных косинусоидальных гармоник.

В этом случае выпрямленный ток

$$|I| = I_d + I_2 \cos 2\omega t - I_4 \cos 4\omega t + I_6 \cos 6\omega t - \dots,$$

где I_d — постоянная слагающая ряда Фурье; $I_2, I_4, I_6 \dots$ — амплитуды 2, 4, 6-й ... гармоник ряда; $\omega = 2\pi f_1$ — угловая скорость выпрямляемого тока I , имеющего частоту $f_1 = 50$ Гц.

Выражая постоянную и гармонические составляющие через амплитуду выпрямляемого тока I_m , получаем:

$$|I| = \frac{2}{\pi} I_m \left(1 + \frac{2}{1 \cdot 3} \cos 2\omega t - \frac{2}{3 \cdot 5} \cos 4\omega t + \frac{2}{5 \cdot 7} \cos 6\omega t - \dots \right). \quad (2-40)$$

Из (2-40) следует, что среднее значение выпрямленного тока $|I|$ равно сумме средних значений его составляющих, и так как среднее значение каждой гармонической составляющей за период равно нулю, то $I_{cp} = I_d$.

Составляющие 4-й гармоники и выше очень малы, и поэтому ими пренебрегают, считая, что переменная слагающая выпрямленного тока состоит в основном из 2-й гармоники I_2 с амплитудой, равной согласно (2-40a) $\frac{4}{\pi \cdot 3} I_m$, угловой скоростью 2ω и частотой $f_2 = 2 f_1 = 100$ Гц, т. е. так, как это было принято в (2-39a).

Пульсация выпрямленного тока вызывает вибрацию контактов исполнительного органа P , поэтому ее необходимо устранять¹. Для этой цели применяются специальные устройства, сглаживающие кривую выпрямленного тока.

Устройство для сглаживания тока ограничивает попадание переменных составляющих тока в реле. Подобные устройства показаны на рис. 2-43. В схеме на рис. 2-43, a последовательно с обмоткой реле P включен дроссель L , индуктивное сопротивление которого $x_L = \omega L = 2\pi fL$ имеет значительную величину для переменной составляющей с $f = 100$ Гц и равно нулю для постоянного тока. В результате постоянная составляющая выпрямленного тока свободно проходит в реле, а величина переменной ограничивается.

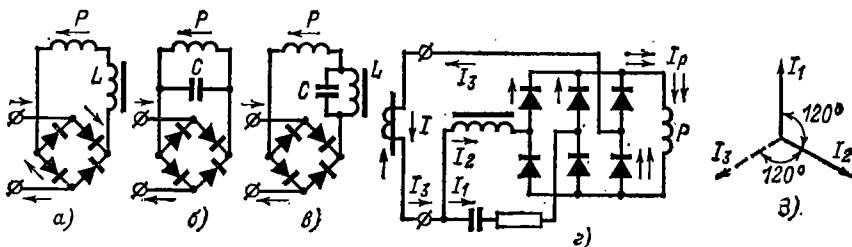


Рис. 2-43. Схемы для сглаживания выпрямленного тока.

a — с последовательным индуктивным сопротивлением; b — с шунтирующим конденсатором; c — с резонансным фильтром, не пропускающим тока с $f = 100$ Гц; d — с расщеплением выпрямляемого тока на три составляющие I_1 , I_2 , I_3 ; e — векторная диаграмма.

В схеме на рис. 2-43, b обмотка реле P шунтирована конденсатором C с сопротивлением $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$, которое обратно пропорционально f . Поэтому большая часть переменной составляющей выпрямленного тока, для которой x_C мало, замыкается через конденсатор C , минуя реле. Для постоянной составляющей конденсатор является бесконечно большим сопротивлением, и поэтому она полностью замыкается через реле.

В схеме на рис. 2-43, c применен контур LC , настроенный в резонанс на частоту 2-й гармоники 100 Гц, преобладающей в выпрямленном токе. Такой фильтр свободно пропускает постоянную составляющую через индуктивность L и представляет большое сопротивление для переменной слагающей. Схемы на рис. 2-43, a , b дают наилучший результат для источников переменного тока с малым сопротивлением по отношению к нагрузкам (реле P); схема на рис. 2-43, c более эффективна для источников с большим по отношению к нагрузке сопротивлением.

¹ В рассматриваемых ниже схемах сравнения абсолютных значений двух электрических величин пульсация выпрямленного тока вызывает кроме вибрации нежелательную зависимость срабатывания реле от угла сдвига между сравниваемыми величинами.

Все приведенные схемы содержат индуктивность и емкость, замедляющие нарастание постоянной составляющей тока в обмотке реле, что вызывает замедление их действия. Особенно большое замедление создают схемы на рис. 2-43, а и б.

В тех случаях, когда увеличение времени действия недопустимо, может применяться более сложная схема (рис. 2-43, в). В этой схеме подлежащий выпрямлению ток I расщепляется на три составляющие I_1 , I_2 и I_3 , равные по величине и взаимно сдвинутые по фазе

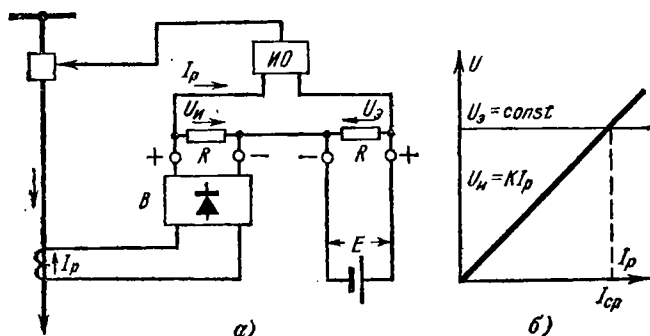


Рис. 2-44. Схема реле на сравнении измеряемой величины (тока I_p) с эталоном I_3 (а) и характеристики срабатывания реле (б).

на 120° с помощью индуктивных и емкостных сопротивлений. Ток $I_3 = -(\dot{I}_1 + \dot{I}_2)$ (рис. 2-43, в и б). Каждый из этих токов самостоятельно выпрямляется, затем они суммируются и подаются в обмотку реле. Результирующий ток в реле I_p весьма близок к постоянному. Эта схема не влияет на быстродействие реле.

Имеется второй вариант выполнения реле тока и напряжения: на выпрямленном токе. По этому варианту (рис. 2-44, а) измеряемая величина U_n сравнивается с эталонной величиной U_3 , изменяющейся по другому закону или имеющей постоянное значение (как показано на рис. 2-44, б). Реле работает, если $U_n \geq U_3$.

Реле на выпрямленном токе отличаются малым потреблением и небольшими размерами.

2-16. РЕЛЕ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, СРАВНИВАЮЩИЕ АБСОЛЮТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ДВУХ НАПРЯЖЕНИЙ U_I и U_{II}

а) Принципы выполнения и работы

Общие принципы выполнения и структурная схема всех видов реле на сравнении абсолютных значений двух напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ одинаковые и показаны в виде блок-схемы на рис. 2-45. Реле состоят из суммирующего устройства 1, выпрямителей 2

(B1 и B2), схемы сравнения абсолютных значений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ 3 и исполнительного органа 4.

Напряжение и ток сети $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$ подводятся к суммирующему устройству, на выходе которого с помощью вспомогательных трансформаторов образуются два напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, по выражениям (2-38). Каждое из этих напряжений выпрямляется двухполупериодными выпрямителями B1, B2 на полупроводниковых диодах. На их выходе получают выпрямленные напряжения $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$, пропорциональные модулям (абсолютным значениям) векторов $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Выпрямленные напряжения подводятся к схеме сравнения 3, где они вычитаются друг из друга, образуя на выходе схемы напряжение

$$U_{\text{вых}} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|. \quad (2-41)$$

На это напряжение к выходным зажимам схемы сравнения включается исполнительный орган 4.

Реле должно действовать при условии, что

$$|\dot{U}_I| > |\dot{U}_{II}| \text{ или } \dot{U}_{\text{вых}} > 0, \quad (2-42)$$

и не должно работать, если $|\dot{U}_I| \leq |\dot{U}_{II}|$.

В соответствии с этим исполнительный орган 4 должен действовать только при положительных значениях $U_{\text{вых}}$; это означает, что исполнительный орган должен быть направленным, т. е. реагировать на полярность подводимого к нему напряжения.

Напряжение U_I , вызывающее работу реле, называется рабочим, а U_{II} — тормозным; соответственно именуются элементы схемы, связанные с U_I и U_{II} .

Изменяя с помощью суммирующего устройства характер зависимости сравниваемых напряжений U_I и U_{II} от U_p и I_p , можно получить как реле мощности, так и различные виды реле сопротивлений.

Рассмотренное реле работает на выпрямленном токе.

б) Выполнение основных элементов реле

Суммирующее (формирующее) устройство служит для образования (формирования) напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ из тока I_p и напряжения U_p , защищаемого элемента по выражению (2-38).

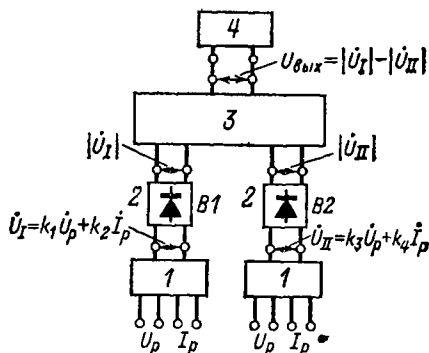


Рис. 2-45. Блок-схема реле на сравнении абсолютных значений двух напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Устройство состоит из двух трансформаторов T_A и T_B (рис. 2-46, а), каждый из которых имеет по одной первичной обмотке и две одинаковые вторичные обмотки. Трансформатор T_A питается напряжением сети U_p , которое наводит во вторичных обмотках э. д. с. $E_{A1} = k_1 \dot{U}_p$ и $E_{A2} = k_3 \dot{U}_p$. Трансформатор T_B питается током сети I_p , который создает во вторичных обмотках э. д. с. $E_{B1} = k_2 \dot{I}_p$ и $E_{B2} = k_4 \dot{I}_p$, пропорциональные I_p . Соединив вторичные обмотки T_A и T_B попарно, A_1 с B_1 последовательно-согласно и A_2 с B_2 последовательно-встречно, получим на выходе первой группы обмоток напряжение $\dot{U}_I = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{B1} = k_1 \dot{U}_p + k_2 \dot{I}_p$, а на второй $\dot{U}_{II} = \dot{E}_{A2} - \dot{E}_{B2} = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p$.

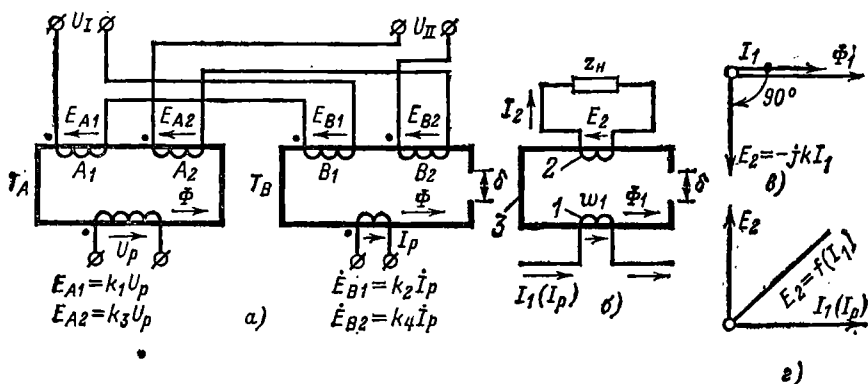


Рис. 2-46. Суммирующее устройство для получения $U_I = k_1 U_p + k_2 I_p$ и $U_{II} = k_3 U_p + k_4 I_p$ (а); трансреактор (б); векторная диаграмма трансреактора (в); зависимость $E_2 = f(I_1)$ (г).

Схема суммирования, показанная на рис. 2-46, служит для получения реле мощности. Если исключить из схемы соединения вторичных цепей T_A и T_B обмотки A_2 и B_1 , то $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$, а $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$, при таком суммирующем устройстве реле превратится в ненаправленное реле сопротивления (см. § 11-10, б). Исключая из схемы обмотку B_1 , получим направленное реле сопротивления (см. § 11-10, в).

Как уже отмечалось, напряжения U_I и U_{II} , образуемые суммирующим устройством, должны иметь линейную зависимость от U_p и I_p . Для выполнения этого требования э. д. с. вторичных обмоток трансформаторов T_A и T_B , из которых формируются напряжения U_I и U_{II} , должны быть строго пропорциональны: E_{A1} и E_{A2} — напряжению U_p , а E_{B1} и E_{B2} — току I_p . Чтобы получить вторичную э. д. с., пропорциональную U_p , трансформатор T_A выполняется в виде трансформатора напряжения. Электродвижущая сила, индуцируемая напряжением U_p в каждой вторичной обмотке

$T_A, E_A = \frac{U_p}{n_n}$, и так как коэффициент трансформации n_n имеет постоянное значение, то E_{A1} и E_{A2} пропорциональны U_p .

Электродвижущая сила $E_B \equiv I_p$ получается от трансформатора T_B , который для этой цели выполняется в виде т р а н с р е а к т о р а.

Трансреактор (рис. 2-46, б) представляет собой трансформатор с воздушным зазором в магнитопроводе. Первичная обмотка трансреактора, так же как и у трансформатора тока, включается последовательно в цепь первичного тока (в схеме на рис. 2-46, а в цепь тока I_p). Вторичная обмотка трансреактора замыкается на большое сопротивление нагрузки z_n и по существу (в отличие от трансформатора тока) работает в разомкнутом режиме. Как следствие этого вторичный ток I_2 очень мал, и поэтому можно считать, что магнитный поток трансреактора Φ_1 создается только н. с. первичной обмотки, равной в нашем случае $I_p w_1$, и что $\Phi_1 = \frac{I_p w_1}{R_m} \equiv I_p$.

Магнитный поток Φ_1 создает во вторичной обмотке трансреактора э. д. с. E_2 (обозначенную на рис. 2-46, а E_{B1} и E_{B2}). Вторичная э. д. с. трансреактора

$$E_2 = 4,44 w_1 \Phi_{1m} f = k' \Phi_{1m} = k I_1. \quad (2-42a)$$

Согласно закону индукции вектор $\dot{E}_2$ отстает от потока Φ_1 , а следовательно, и тока I_p на 90° (рис. 2-46, в). С учетом этого в комплексной форме

$$\dot{E}_2 = -j k \dot{I}_1.$$

Благодаря наличию воздушного зазора δ магнитное сопротивление R_m магнитопровода трансреактора имеет повышенное значение и определяется в основном сопротивлением воздушного зазора. Это уменьшает величину магнитного потока Φ_1 по сравнению с его значением при том же токе I_p в таком же, но замкнутом стальном магнитопроводе и ограничивает насыщение магнитопровода трансформатора.

Величина воздушного зазора δ подбирается так, чтобы в желаемом диапазоне токов I_p магнитопровод трансреактора не насыщался. При соблюдении этого условия коэффициент k в выражении (2-42a) будет постоянной величиной и, как следствие этого, зависимость E_2 от I_p будет линейной (рис. 2-46, г), и следовательно условие $E_2 \equiv I_p$ будет обеспечено. Следует отметить, что коэффициент k в (2-42 а) определяет соотношение между величинами вторичной э. д. с. E_2 и первичным током $I_1 = I_p$. Из (2-42 а) $k = E_2 / I_p$. Это выражение показывает, что коэффициент k имеет размерность сопротивления. С учетом, что ток I_1 (I_p) сдвинут относительно E_2 на 90° , величина k может рассматриваться, как некоторое реактивное сопротивление x в цепи первичного тока I_p или как сопротивление взаимной индукции между первичной и вто-

ричной обмотками трансреактора. Таким образом, трансреактор равноценен реактору с сопротивлением $x = k$, включенным в цепь тока I_p . Этим и объясняется его название трансформаторный реактор или сокращенно трансреактор.

Из всего сказанного выше следует, что трансреактор преобразует первичный ток I_p во вторичное напряжение E_2 , пропорциональное первичному току, и может работать с разомкнутой вторичной обмоткой аналогично трансформатору напряжения. Эти особенности трансреактора объясняются наличием воздушного зазора в его магнитопроводе. Обычный трансформатор тока не может обеспечить линейной зависимости E_2 от I_p из-за насыщения магнитопровода и не допускает работы с разомкнутой вторичной обмоткой, так как при этом за счет исчезновения размагничивающего действия тока I_2 резко возрастает магнитный поток Φ_1 , вследствие чего увеличиваются до опасного значения вызываемые им э. д. с. E_2 и вихревые токи в магнитопроводе.

Трансреакторы применяются не только в суммирующих устройствах, они широко используются в схемах и устройствах современных релейных защит.

Выпрямители. Выпрямление напряжений U_I и U_{II} осуществляется по двухполупериодной схеме выпрямительными мостами из полупроводниковых диодов. Сглаживание выпрямленных напряжений производится с помощью схем на рис. 2-43.

Схемы сравнения [Л. 87, 105]. Сравнение величины двух выпрямленных напряжений $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ можно осуществить электрическим путем, сравнивая эти напряжения или пропорциональные им токи, или магнитным путем, сравнивая магнитные потоки, пропорциональные напряжениям U_I и U_{II} . В соответствии с этим применяются три схемы сравнения: на равновесии (на балансе) напряжений, на балансе (циркуляции) токов и на балансе магнитных потоков (рис. 2-47).

В схеме сравнения на равновесии (балансе) напряжений (рис. 2-47, а) выпрямители B_1 и B_2 соединяются между собой одноименными полюсами (плюс с плюсом и минус с минусом). В рассечку провода к зажимам $m - n$ включается реле (исполнительный орган) $ИО$. В контуре $ИО$ напряжения $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ направлены встречно. Под влиянием разности $|\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$ в исполнительном органе появляется ток I_p , направление которого зависит от того, какое из напряжений больше. При $|\dot{U}_I| > |\dot{U}_{II}|$ ток I_p имеет положительный знак и $ИО$ работает, при $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$ ток I_p имеет отрицательный знак и $ИО$ не действует.

Резисторы R_1 и R_2 шунтируют выпрямители и образуют контур с малым сопротивлением, по которому проходит ток I_p помимо выпрямителей, представляющих большое сопротивление для токов обратного напряжения. В рассмотренной схеме балансируются

(уравновешиваются) напряжения U_I и U_{II} , что и определило название схемы.

В схеме сравнения на циркуляции (балансе) токов (рис. 2-47, б) выпрямители B_1 и B_2 соединяются последовательно разнополярными зажимами. Исполнительный орган $ИО$ включается к зажимам m и n параллельно обоим выпрямителям. Сравнимые напряжения U_I и U_{II} создают пропорциональные им токи $|\dot{I}_I|$ и $|\dot{I}_{II}|$, замыкающиеся через $ИО$ навстречу друг другу. В реле $ИО$ проходит ток $I_p = |\dot{I}_I| - |\dot{I}_{II}|$. Направление этого тока зависит от того, какое из напряжений U_I или U_{II} больше. При равенстве U_I и U_{II} ток $I_p = 0$. Таким образом, в данной схеме сравнение U_I и U_{II} производится путем вычитания создаваемых ими токов в обмотке реле. Балластные сопротивления

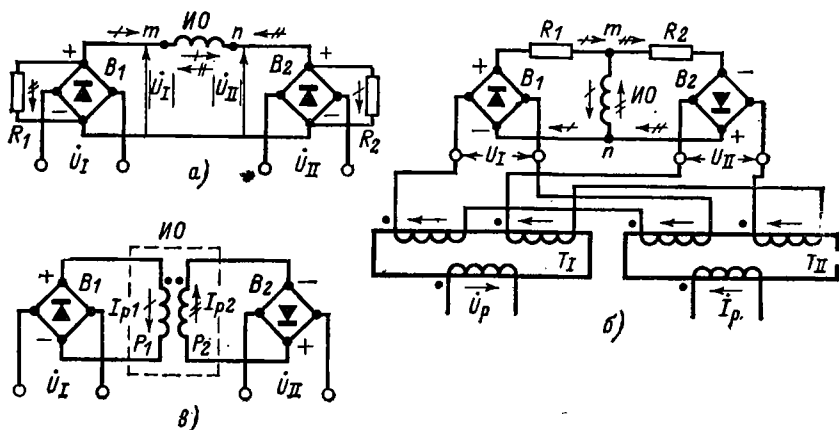


Рис. 2-47. Схема сравнения.

а — на равновесии напряжений; б — на циркуляции токов (балансе токов); в — на балансе магнитных потоков.

R_1 и R_2 устанавливаются для того, чтобы исполнительный орган не оказался зашунтированным сопротивлением работающего выпрямителя приемной стороны (так называется выпрямитель, имеющий меньшее напряжение). Необходимость балластных сопротивлений зависит от соотношения сопротивлений реле и выпрямителей.

Рассмотренная схема называется схемой с циркулирующими токами, поскольку в проводах, соединяющих выпрямители B_1 и B_2 , всегда проходит (циркулирует) ток.

В схеме с магнитным сравнением (рис. 2-47, в) исполнительный орган выполняется с двумя обмотками P_1 и P_2 .

Каждая из обмоток подключается к своему выпрямителю так, чтобы токи в них имели встречное направление.

При этом условия токи I_{p1} и I_{p2} создают встречно-направленные магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , которые и сравниваются между собой в магнитопроводе реле.

Поведение реле зависит от знака результирующего потока $\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2$.

При равенстве $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ ток $I_{p1} = I_{p2}$, поток $\Phi_p = 0$, реле бездействует.

Если $|\dot{U}_I| \neq |\dot{U}_{II}|$, то $\Phi_p \neq 0$. Знак Φ_p зависит от того, какое из сравниваемых напряжений больше. При $\Phi_p > 0$ реле работает, а при $\Phi_p < 0$ — не действует.

На рис. 2-47, б показана полная схема реле направления мощности на фазочувствительной схеме при сравнении напряжений U_I и U_{II} на принципе баланса токов. Для упрощения в схеме не показаны сглаживающие устройства.

Исполнительный орган. Как уже отмечалось, исполнительный орган включается на выходные зажимы схемы сравнения и должен действовать только при положительных значениях тока или напряжения на этих зажимах. Поэтому исполнительный орган должен выполняться с помощью направленных реле постоянного тока, реагирующих на знак тока I_p .

Устройство подобного типа часто называют нуль-индикатором, поскольку оно реагирует на отклонение от нуля выходного тока или напряжения, т. е. реагирует не на величину, а на знак входного сигнала. К рассматриваемому реагирующему (исполнительному) органу (нуль-индикатору) предъявляются четыре основных требования: высокая чувствительность, т. е. способность реагировать на знак возможно меньшего сигнала (тока или напряжения); малое потребление мощности; быстрота действия; надежность работы.

В качестве исполнительных органов (нуль-индикаторов), отвечающих предъявленным требованиям, могут использоваться:

- 1) высокочувствительные электромеханические реле — поляризованные или магнитоэлектрические;
- 2) электромеханические реле, включаемые через полупроводниковый усилитель;
- 3) бесконтактные реле на полупроводниковых приборах.

Наиболее простым и довольно часто применяемым вариантом является первый: использование поляризованных или магнитоэлектрических реле.

В тех случаях, когда требуется повышенная чувствительность, применяется включение электромеханических реле через усилитель постоянного тока. Потребление мощности при срабатывании таких усилителей составляет около $3 \cdot 10^{-5}$ Вт.

Усилитель постоянного тока реагирует на знак входного сигнала, поэтому исполнительное реле, включаемое на его выходе, может быть ненаправленным, так как усилитель будет подавать в него ток только при положительных значениях $U_{\text{вых}}$ схемы сравнения. Поэтому имеется возможность применения обычного более грубого электромагнитного реле с более надежной контактной системой.

Еще большее повышение чувствительности при полном исключении электромеханических конструкций можно получить при применении усилителя, работающего в релейном режиме. Мощность, необходимая для срабатывания такого реле, равна примерно $10^{-5} - 10^{-6}$ Вт.

В виде примера на рис. 2-49 приведена одна из наиболее простых схем усилителя, разработанная лабораторией Энергосеть-проекта, которая может применяться в качестве нуля-индикатора по второму варианту.

Поскольку основным элементом усилителя являются полупроводниковые триоды (транзисторы), напомним некоторые особенности их работы [Л. 15, 16, 17, 105].

Плоскостной полупроводниковый триод (транзистор) (рис. 2-48, а) представляет монокристалл (германия или

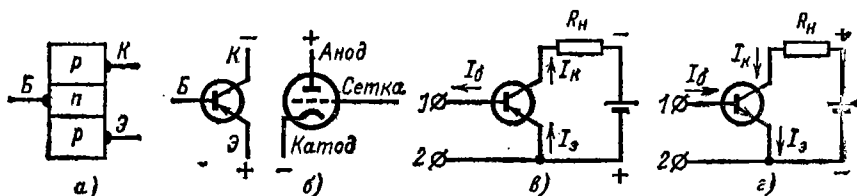


Рис. 2-48. Полупроводниковый триод (транзистор).

а — схема устройства полупроводникового триода $p-n-p$; б — условное изображение триода; в — включение полупроводникового триода типа $p-n-p$ по схеме с общим эмиттером; г — включение триода типа $n-p-n$ по аналогичной схеме.

кремния), состоящий из трех слоев с чередующейся проводимостью: $p-n-p$ или $n-p-n$. В области полупроводника с проводимостью n основными (преобладающими) носителями заряда являются отрицательные электроны, а в области с проводимостью p — положительные дырки. Рассмотрим транзистор типа $p-n-p$. Нижняя область транзистора (рис. 2-48, а) называется эмиттером (Э), средняя — базой (Б) и верхняя — коллектором (К). База по сравнению с эмиттером и коллектором имеет очень маленькую ширину слоя и значительно меньшую концентрацию носителей заряда.

Эмиттер, база и коллектор выполняют функции, аналогичные функциям катода, сетки и анода электронной лампы (рис. 2-48, а и б), при этом роль управляющей сетки лампы выполняет база транзистора.

Полупроводниковый триод состоит из двух переходов $p-n$ и $n-p$: один — между эмиттером и базой, называемый эмиттерным, и второй — между базой и коллектором, называемый коллекторным.

Переход $p-n$ работает как выпрямитель, пропускающий ток только в одном направлении при подаче на него внешнего напряжения прямой полярности, т. е. при подводе плюса к области p и минуса к области n . При отсутствии внешнего напряжения пере-

ход заперт вследствие образующихся на его границе объемных зарядов противоположных знаков, которые создают электрическое поле, препятствующее переходу дырок из области p в область n и электронов из области n в область p . При подаче обратного внешнего напряжения (плюса на n и минуса на p) поле объемных зарядов усиливается внешним полем и переход запирается еще больше.

Это свойство переходов p - n играет решающую роль в работе триодов.

Для усиления мощности поступающего сигнала очень распространена схема с общим эмиттером (рис. 2-48, *в*), при которой на транзистор p - n - p от источника внешнего напряжения плюс подается к эмиттеру, а минус — к коллектору. Управляющий сигнал подключается между базой и эмиттером.

При отсутствии входного сигнала оба перехода — эмиттерный и коллекторный — заперты и триод не работает — закрыт. *Если на базу подан положительный потенциал относительно эмиттера, то эмиттерный переход остается закрытым, так как такая полярность напряжения является для него обратной.*

При подаче на базу транзистора p - n - p отрицательного по отношению к эмиттеру потенциала переход база — эмиттер открывается, поскольку поданное напряжение является прямым для перехода p - n .

В этом случае дырки, являющиеся носителями положительных зарядов, двигаются под действием электрического поля, созданного приложенным напряжением от эмиттера в базу, частично рекомбинируются, вызывая ток I_b , замыкающийся через источник управляющего сигнала. Остальная, большая часть дырок (90—99%) вследствие малой толщины слоя базы достигает границы коллекторного перехода. Коллекторный переход закрыт для основных носителей базы — электронов, по дырки обладают положительным зарядом и поэтому, попадая в сильное электрическое поле, создаваемое отрицательным потенциалом коллектора, ускоряются и втягиваются — «захватываются» коллектором. Там они рекомбинируются с электронами, поступающими из внешней сети.

Таким образом, в триоде p - n - p появляется ток, обусловленный движением положительно заряженных дырок.

На основе сказанного можно сделать краткий вывод: *триод типа p - n - p открывается при подаче на базу отрицательного сигнала, открывающего эмиттерный переход; после открытия эмиттерного перехода происходит впрыскивание дырок из эмиттера в базу, «дрейф» их в базе в направлении коллекторного перехода и захват дырок коллектором.*

Транзистор типа n - p - n включается по схеме на рис. 2-48, *г*. Для его открытия на базу триода необходимо подать положительный по отношению к эмиттеру потенциал.

В транзисторах обоих типов сигнал, поданный на базу ($I_b = 0,05 I_c$), открывает транзистор, и под влиянием внешнего ис-

точника в нагрузку появляется ток $I_K = I_3 - I_6$. Если принять $I_3 = 1$, то ток I_K приблизительно равен $(1 - 0,05) I_3 = 0,95 I_3$. Отношение $\Delta I_K / \Delta I_3 = \alpha$ называется коэффициентом усиления по току, он достигает величины 0,9—0,95.

Транзисторы используются как усилители напряжения, тока и мощности, позволяющие при слабом сигнале на входе (на базе) получить усиленный сигнал на выходе. При этом напряжение на нагрузке R_n , создаваемое внешним источником, во много раз превосходит напряжение сигнала на входе усилителя (зажимы 1—2). Так, за счет мощности постороннего источника происходит усиление сигнала с помощью полупроводникового триода.

Нуль-индикатор [Л. 17, 18, 87, 105], показанный на рис. 2-49, представляет собой усилитель постоянного тока на полупроводниковых триодах, на выходе которого включается поляризованное реле P . Чем больше усиливается входной сигнал, тем чувствительнее нуль-индикатор. Поэтому усилитель нуль-индикатора выполняется из нескольких каскадов. Усилитель рассматриваемого нуль-индикатора выполнен двухкаскадным по схеме с общим эмиттером (см. § 11-14, в), обеспечивающей наибольшее усиление входного сигнала ($U_{вх}$).

От внешнего источника напряжения на коллекторы триодов T_1 и T_2 подан минус, а на эмиттеры — плюс. Управляющий сигнал U_c , получаемый с выхода схемы сравнения, подается на входные зажимы усилителя 1 и 2, к которым подключены база и эмиттер.

В качестве выходного реле P (нуль-индикатора) применено поляризованное реле. Его обмотка включена в цепь коллектора триода T_2 .

Резистор R_1 служит для подачи отрицательного смещения на базу триода T_1 . Сопротивление R_2 вместе с сопротивлением триода T_1 (между коллектором и эмиттером) образует делитель напряжения, к точке 3 которого подключена база триода T_2 .

При отсутствии входного сигнала на зажимах 1—2 (I_c и $U_c = 0$) триод T_1 получает отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал через сопротивления R_1 , поэтому T_1 открыт. Сопротивление открытого триода T_1 близко к нулю, вследствие этого потенциал точки 3 и база T_2 имеют положительный знак. При положительном знаке на базе триод T_2 закрыт и ток в реле P отсутствует (или, точнее, он очень мал и равен обратному току коллекторного перехода T_2).

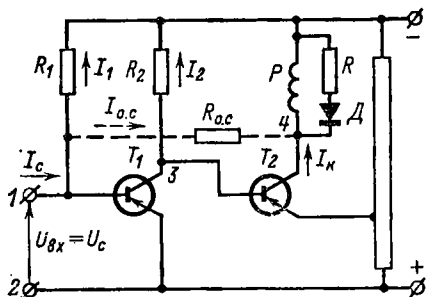


Рис. 2-49. Схема двухкаскадного усилителя постоянного тока, применяемая в качестве нуль-индикатора.

При появлении на входе 1—2 отрицательного сигнала триод T_1 остается открытым, а T_2 закрытым. Если же на вход 1—2, а следовательно, и на базу T_1 поступает положительный сигнал, то триод T_1 закрывается, его сопротивление резко возрастает и в результате этого на базе T_2 появляется отрицательный потенциал через сопротивление R_2 . Триод T_2 открывается, в реле P появляется ток I_K . Если $I_K > I_{с.р}$ реле P , то оно действует.

При прекращении входного сигнала схема возвращается в первоначальное состояние. Триод T_2 закрывается, и ток I_K в обмотке реле исчезает. Вследствие индуктивности L обмотки реле P на ее зажимах возникает значительная э. д. с. самоиндукции $e = -L \frac{dI_K}{dt}$, которая может вызвать пробой триода T_2 . Для пре-

дотвращения этого обмотка реле шунтируется резистором R и диодом D . При наличии такого шунта ток в реле после закрытия T_2 исчезает не сразу, а постепенно, замыкаясь по цепи $R - D$, в результате чего э. д. с. самоиндукции не достигает опасного значения. Диод D запирает прохождение тока I_K при открытом триоде T_2 по шунтирующему резистору R . Благодаря этому весь ток I_K проходит через обмотку реле P . Для упрощения на схеме не показаны диоды и цепи, предусматриваемые для компенсации влияния температуры на работу триодов и ограничения на них напряжения, поскольку они не имеют принципиального значения для работы схемы.

Рассмотренный усилитель потребляет при срабатывании выходного реле около $6 \cdot 10^{-5}$ Вт.

На базе описанной схемы выполняются полупроводниковые бесконтактные реле. В этом случае схема усилителя дополняется обратной связью (показана пунктиром) и он работает как триггер [Л. 17, 18, 87]. Широкое применение находят также трехкаскадные усилители, позволяющие получить на выходе большую мощность, чем двухкаскадные.

в) Реле направления мощности

Схема и принцип действия.

Схема реле направления мощности на сравнении величин двух напряжений U_I и U_{II} , построенная по блок-схеме (рис. 2-45), приведена на рис. 2-50. Для упрощения на схеме не показано суммирующее устройство, которое выполняется согласно рис. 2-46, а. В качестве схемы сравнения принята довольно распространенная схема на балансе напряжений, а в ка-

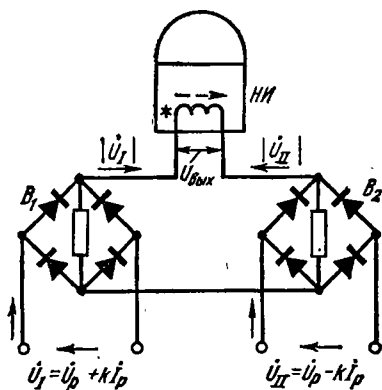


Рис. 2-50. Схема реле направления мощности на сравнении абсолютных величин U_I и U_{II} .

честве нуль-индикатора *НИ* показано магнитоэлектрическое (или поляризованное) реле. Применяются и другие варианты исполнения обоих элементов.

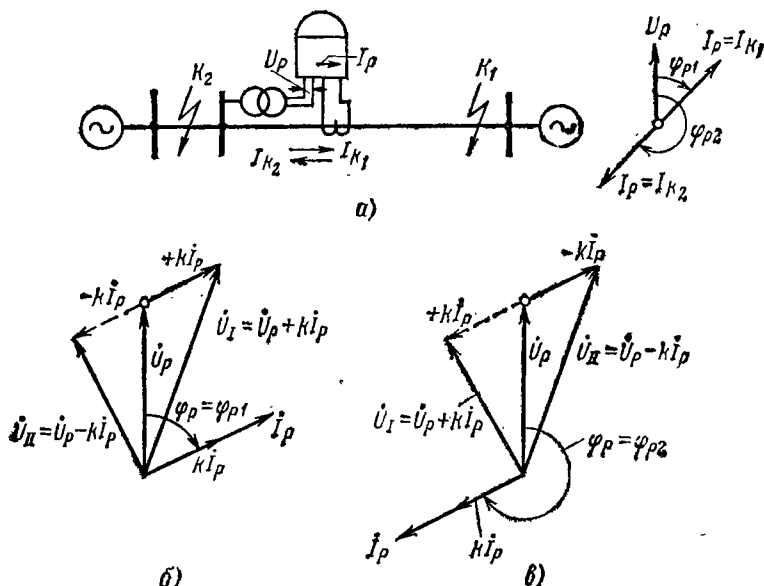


Рис. 2-51. Векторная диаграмма реле.

а — схема сети; б — диаграмма при к. з. в зоне; в — диаграмма при к. з. вне зоны.

Сравниваемые напряжения, получаемые с помощью сумматора и подводимые к зажимам выпрямителей B_1 и B_2 , выражаются уравнениями:

$$\dot{U}_I = \dot{U}_p + k\dot{I}_p \text{ и } \dot{U}_{II} = \dot{U}_p - k\dot{I}_p. \quad (2-43)$$

Это соответствует выражениям (2-38), если принять в них

$$k_1 = k_3 = 1, \text{ а } k_2 = k_4 = k.$$

После выпрямления на схему сравнения подаются напряжения

$$|\dot{U}_I| = |\dot{U}_p + k\dot{I}_p|$$

$$|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_p - k\dot{I}_p|.$$

Эти напряжения в контуре схемы сравнения направлены встречно, в результате чего

$$\dot{U}_{\text{вых}} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_p + k\dot{I}_p| - |\dot{U}_p - k\dot{I}_p|.$$

Реле будет действовать, если $|\dot{U}_p + k\dot{I}_p| > |\dot{U}_p - k\dot{I}_p|$.

Работа реле. Покажем, что рассмотренная схема ведет себя как реле направления мощности. На рис. 2-51 приведены векторные диаграммы $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$, $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ при к. з. на защищаемой линии в точке K_1 и на соседней линии в точке K_2 , построенные в предположении, что вектор напряжения $k\dot{I}_p$ совпадает по фазе с током $\dot{I}_p$.

Из этих диаграмм следует, что при к. з. на защищаемой линии (в точке K_1 , см. рис. 2-51, а и б), когда мощность направлена от шин в линию и имеет положительный знак, модуль вектора $|\dot{U}_p + k\dot{I}_p| > |\dot{U}_p - k\dot{I}_p|$, поэтому $U_{\text{вых}}$ имеет положительный знак и реле действует. При к. з. на соседней линии (в точке K_2 , рис. 2-51, а и в) мощность направлена к шинам подстанции и имеет отрицательный знак.

В этом случае вектор тока $\dot{I}_p$ и соответственно вектор $k\dot{I}_p$ по сравнению с к. з. в точке K_1 изображаются на диаграмме повернутыми на 180° (рис. 2-51, в). В результате этого $|\dot{U}_p + k\dot{I}_p| \leq |\dot{U}_p - k\dot{I}_p|$, напряжение $U_{\text{вых}}$ становится отрицательным и реле не действует. Из этого следует, что реле ведет себя при к. з. как реле направления мощности. Реле действует, если мощность направлена от шин, и не работает, если она направлена к шинам.

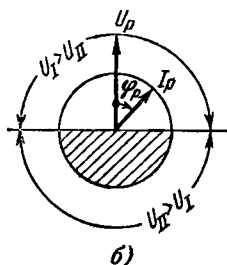
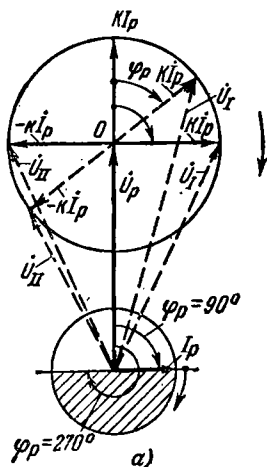


Рис. 2-52. Векторные диаграммы реле, показывающие поведение реле при различных φ_p .

Пользуясь диаграммой на рис. 2-52, выясним характер изменения знака и значения $U_{\text{вых}}$, т. е. найдем зависимость $U_{\text{вых}} = f(\varphi_p)$. Для этой цели примем, что значение $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$ не меняются, и будем вращать вектор $\dot{I}_p$ по часовой стрелке, изменяя, таким образом, φ_p ; тогда вектор $k\dot{I}_p$ будет описывать окружность с центром в точке O , соответствующей концу вектора $\dot{U}_p$. Определяя $U_{\text{вых}} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$ при разных φ_p , устанавливаем:

1) при изменении φ_p от 90° до 180° и от 180° до 270° (заштрихованная часть диаграммы на рис. 2-52, а) $|\dot{U}_I| < |\dot{U}_{II}|$, следовательно, $U_{\text{вых}} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$ имеет отрицательный знак и реле не действует;

2) при изменении φ_p от 270° до 360° и от 0° до 90° (незаштрихованная часть диаграммы) $|\dot{U}_I| > |\dot{U}_{II}|$, поэтому $U_{\text{вых}}$ положительно и реле работает;

3) величина $U_{\text{вых}}$ равна нулю при $\varphi_p = 90^\circ$ и 270° , так как при этом $|\dot{U}_I| = |\dot{U}_{II}|$. При $\varphi_p = 0^\circ$ и 180° $U_{\text{вых}}$ достигает максимального значения,

в этих случаях $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ совпадают по фазе и их разность равна диаметру окружности, т. е. $2kI_p$; при промежуточных значениях φ_p $U_{\text{вых}}$ меняется от 0° до $2kI_p$. Следовательно, реле работает в наилучших условиях при $\varphi_p = 0$ и 180° и не действует из-за отсутствия напряжения при 90 и 270° .

Напряжение $U_{\text{вых}}$ рассмотренной схемы сравнения изменяет свой знак при изменении φ_p (рис. 2-52, б), так же как момент M_φ у реле косинусного типа (см. рис. 2-37, б). Следовательно, рассмотренное реле является реле направления мощности косинусного типа.

Осуществляя поворот напряжений $\dot{U}_p$ или $k\dot{I}_p$ на угол α с помощью специальных фазосдвигающих схем, можно сместить угловую характеристику реле на угол α и получить аналогичное реле мощности смешанного или синусного типа.

Таким образом, реле, построенное на сравнении абсолютных величин $|\dot{U}_p + k\dot{I}_p|$ и $|\dot{U}_p - k\dot{I}_p|$, реагирует (косвенно) на угол сдвига фаз между U_p и I_p , и работает как реле направления мощности.

2-17. РЕЛЕ НА СРАВНЕНИИ ФАЗ ДВУХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН U_I и U_{II}

а) Общие принципы выполнения реле

На сравнении фаз двух электрических величин можно выполнять реле направления мощности и различные типы реле сопротивлений. В качестве сравниваемых величин используются два

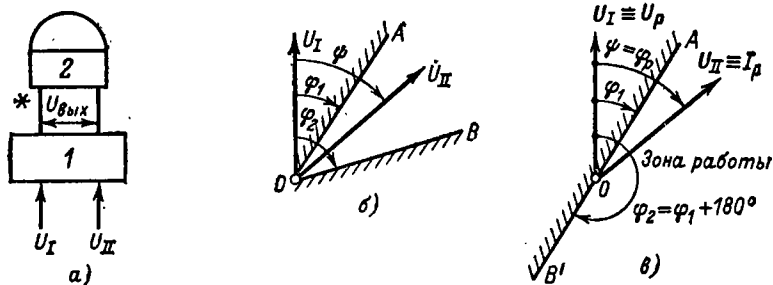


Рис. 2-53. Реле на сравнении фаз $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (а); угловая характеристика работы реле (б) и угловая характеристика реле направления мощности (в).

напряжения U_I и U_{II} , которые являются линейными функциями напряжения и тока сети U_p и I_p по выражениям (2-38).

Принцип действия. Реле на сравнении фаз (рис. 2-53, а) состоит из устройства сравнения фаз (фазосравнивающей схемы) 1 и исполнительного органа 2, реагирующего на знак выходного напряжения $U_{\text{вых}}$.

Реле реагирует на угол ψ сдвига фаз между сравниваемыми напряжениями U_I и U_{II} и приходит в действие при значении ψ ,

удовлетворяющем условию

$$\varphi_1 < \psi < \varphi_2, \quad (2-44)$$

где φ_1 и φ_2 — углы, ограничивающие зону действия реле (рис. 2-53, б).

Знак и значение выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ фазосравнивающей схемы, определяющего поведение реле, зависят от величины сдвига фаз ψ между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, т. е. $U_{\text{вых}} = f(\psi)$. При выполнении условия (2-44) $U_{\text{вых}}$ положительно и исполнительный орган действует. Если ψ меньше φ_1 или больше φ_2 , то $U_{\text{вых}}$ отрицательно и исполнительный орган не работает.

Изменяя коэффициенты k в (2-38), т. е. меняя зависимость U_I и U_{II} от напряжения U_p и тока I_p сети, можно получить различные виды реле.

В частности, для получения реле направления мощности необходимо принять $k_2 = k_3 = 0$. Тогда $U_I = k_1 U_p$, $U_{II} = k_4 I_p$, а угол ψ , на который реагирует реле, равен углу сдвига фаз φ_p между $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$. Если в (2-44) взять $\varphi_2 = \varphi_1 + 180^\circ$, то характеристика срабатывания реле изображается прямой AOB' (рис. 2-53, в). Подобное реле ведет себя как орган направления мощности (см. § 2-12).

Способы сравнения. Реле сравнения фаз по способу сравнения фаз U_I и U_{II} , или, иначе говоря, по типу фазосравнивающей схемы, подразделяются на реле, основанные на импульсном принципе, на схеме, сопоставляющей продолжительность времени совпадения фаз с заданным, и на кольцевой фазосравнивающей схеме.

б) Реле на сравнении фаз, работающие на импульсном принципе

Принцип действия. Сравнение фаз в этой конструкции осуществляется сопоставлением знаков мгновенных значений, подведенных к реле напряжений (U_I и U_{II}), в определенный момент времени, например в момент положительного максимума напряжения U_I (рис. 2-54).

Для этой цели при прохождении напряжения U_I через положительный максимум формируется короткий импульс напряжения U_I' (рис. 2-54, а). Если положительный импульс U_I' совпал с положительным мгновенным значением второго напряжения U_{II} , то на выходе схемы (рис. 2-53, а) появляется сигнал (напряжение $U_{\text{вых}}$) и исполнительный орган реле срабатывает. Если знаки импульса U_I' и напряжения U_{II} различны — реле не действует.

Как видно из рис. 2-54, а, при выбранном моменте сравнения (во время прохождения U_I через максимум) совпадение положительных значений U_I и U_{II} возможно при условии, что угол сдвига фаз ψ между U_I и U_{II} будет находиться в пределах от -90° до $+90^\circ$. Следовательно, условие работы реле имеет вид

$$-90^\circ \leq \psi \leq +90^\circ. \quad (2-45)$$

Выражение (2-45) показывает, что диапазон изменения угла ψ , в пределах которого реле срабатывает, равен 180° . Угловая характеристика работы импульсного реле приведена на рис. 2-54, б.

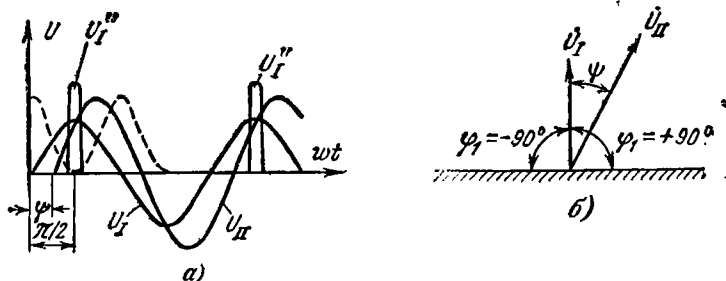


Рис. 2-54. Принцип действия импульсного реле.

Таким образом, совпадение импульса U_I' , появляющегося в момент положительного максимума U_I , с положительным значением U_{II} является признаком, что угол ψ между U_I и U_{II} лежит

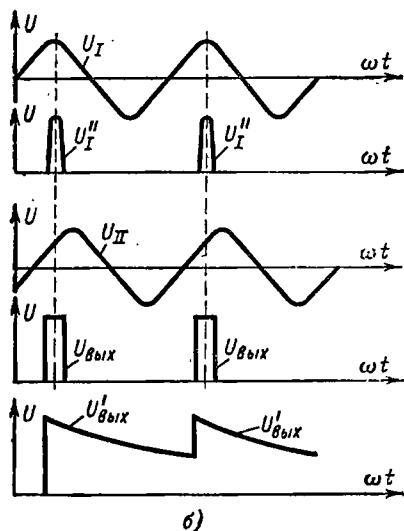
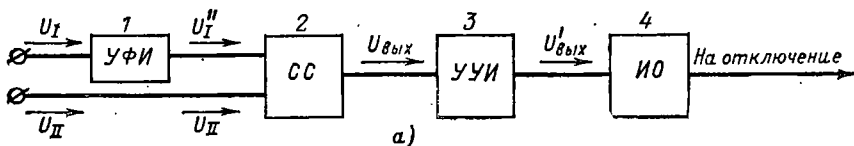


Рис. 2-55. Структурная схема импульсного реле (а); диаграмма работы реле (б).

в диапазоне $+90^\circ \div -90^\circ$. На этом базируется устройство импульсных реле.

Структурная схема и диаграмма работы импульсного реле приведены на рис. 2-55. Основным элементом схемы является устрой-

ство I для формирования импульса напряжения U_I' в момент прохождения U_I через положительный максимум.

Импульс U_I' и напряжение U_{II} подаются на схему совпадения 2. Последняя выполнена так, что напряжение на ее выходе $U_{\text{вых}}$ появляется, только когда оба входных напряжения U_I' и U_{II} положительны. Выходное напряжение имеет характер кратковременного импульса, продолжительность которого равна длительности U_I' и составляет доли периода. Чтобы обеспечить продолжительность действия выходного реле 4, достаточную для отключения выключателей, предусматривается устройство 3, удлиняющее импульс $U_{\text{вых}}$ до необходимой величины. Удлиненный импульс $U'_{\text{вых}}$ воздействует на исполнительный орган 4, который дает команду на отключение.

Диаграмма работы импульсного реле показана на рис. 2-55, б.

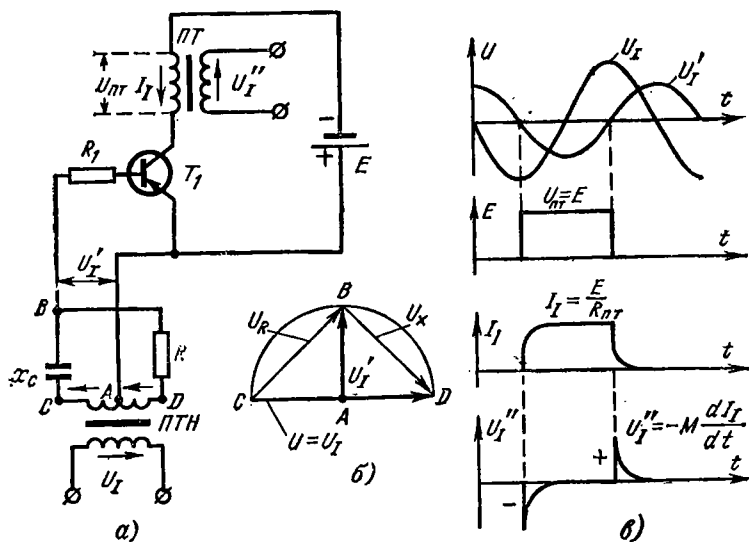


Рис. 2-56. Устройство для получения импульса U_I'' (а); схема устройства (б); диаграмма фазоповоротной схемы (в).

В качестве примера на рис. 2-56, а приведено устройство для получения импульса U_I' . Напряжение U_I подается на промежуточный трансформатор $ПТН$, питающий мостовую фазоповоротную схему.

Напряжение U_I' между вершиной моста B и средней точкой A вторичной обмотки $ПТН$ подается на базу триода T_I . Сопротивление R принимается равным x_C , при этом условии U_I' опережает U_I на угол 90° (рис. 2-56, б). В цепи коллектора T_I включен пик-трансформатор $ПТ$.

Триод T_I заперт в течение положительной полуволны U_I' и открыт в течение отрицательной. Открываясь, триод T_I замыкает цепь первичной обмотки $ПТ$, в которой под действием э. д. с. E возникает постоянный ток I_I (рис. 2-56, а).

Открытие и закрытие триода происходит в момент перехода U_I' через нуль. В этот момент в первичной обмотке ПТ появляется и исчезает ток I_I и возникает переходный процесс, сопровождающийся появлением во вторичной цепи ПТ пикообразного напряжения $U_I'' = -M \frac{dI_I}{dt}$ обратной полярности. Кривые токов и напряжений в пик-трансформаторе даны на рис. 2-56, б.

Таким образом, импульс напряжения U_I' получается с помощью пик-трансформатора. Его возникновение в момент прохождения через максимум U_I обеспечивается тем, что напряжение U_I' , управляющее пик-трансформатором, смещено посредством фазосмещающей схемы на 90° по отношению к U_I .

Реле направления мощности. Если принять $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$, а $\dot{U}_{II} = k_4 I_p$, то реле по схеме на рис. 2-55 будет работать как реле направления мощности синусного типа. Сместив на угол α напряжение U_p , можно получить реле промежуточного и косинусного типа. Если $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ сформированы по выражениям (2-38), то реле будет работать как реле сопротивления.

в) Реле на сравнении фаз, основанные на измерении времени совпадения знаков мгновенных значений сравниваемых напряжений U_I и U_{II}

Принцип действия. В общем случае к реле подводятся напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, сдвинутые по фазе на угол ψ , как это показано на рис. 2-57, а.

В течение определенной части положительного полупериода U_I (отмеченной штриховкой на рис. 2-57, б), знаки мгновенных значений U_I и U_{II} одинаковы, а в другой (не заштрихованной) — различны. В отрицательном полупериоде U_I картина совпадения и различия знаков обоих напряжений повторяется.

Угол совпадения φ_c , в пределах которого знаки U_I и U_{II} совпадают, и соответствующее ему время совпадения знаков t_c зависят от угла сдвига фаз ψ . Как видно из рис. 2-57, б, угол совпадения

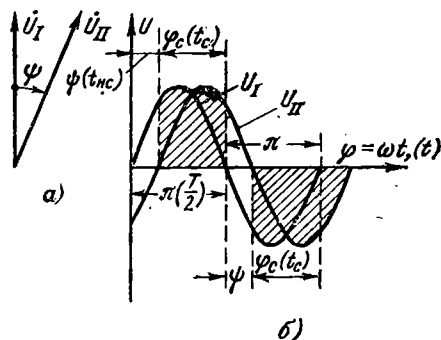


Рис. 2-57. Векторная диаграмма $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (а); совпадение знаков мгновенных значений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (б).

$$\varphi_c = \pi - \psi.$$

$$(2-46)$$

Угол $\varphi_c = \omega t_c$, $\psi = \omega t_{nc}$ и $\pi = \omega T/2$, подставив их в (2-46) и разделив все члены уравнения на ω , находим зависимость вре-

мени совпадения t_c от ψ

$$t_c = \frac{T}{2} - t_{nc} = \frac{T}{2} - \frac{\psi}{\omega}, \quad (2-47)$$

где t_{nc} — время несовпадения фаз.

На основании (2-47) полученную зависимость $t_c = f(\psi)$ можно представить графически, как это показано на рис. 2-58.

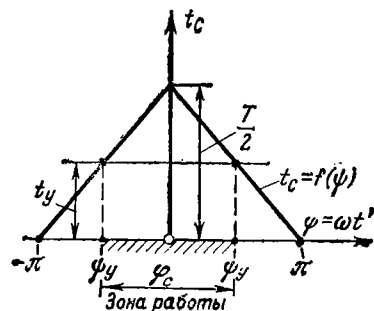
При совпадении фаз ($\psi = 0$) знаки мгновенных величин U_I и U_{II} будут совпадать в течение всего полупериода, при этом $\varphi_c = \pi$, а $t_c = T/2$.

С увеличением ψ φ_c и t_c будут уменьшаться, становясь меньше π и $T/2$. Когда фазы U_I и U_{II} разойдутся на 180° ($\psi = \pi$), знаки U_I и U_{II} будут различны в течение всего полупериода и поэтому φ_c и $t_c = 0$.

Поскольку согласно (2-47) время совпадения фаз t_c определяется ψ , то оно в свою очередь характеризует величину сдвига фаз ψ . Эта взаимосвязь и положена в основу конструкции реле на рассматриваемом принципе.

Для получения реле подобного типа применяется схема, измеряющая время t_c совпадения знаков напряжений U_I и U_{II} . Это время сопоставляется (сравнивается) с

Рис. 2-58. Зависимость времени совпадения от ψ .



некоторым заданным (установленным) временем t_y , которому из (2-47) соответствует определенное значение $\psi = \psi_y$. Реле действует, если

$$t_c \geq t_y, \quad (2-48)$$

и не работает, если

$$t_c < t_y. \quad (2-48a)$$

Имея в виду, что каждому значению t_c и t_y соответствует определенное ψ , полученное из (2-47) или диаграммы на рис. 2-58, можно считать, что реле работает при $\psi \leq \psi_y$, где по (2-47)

$$\psi_y = \left(\frac{T}{2} - t_y \right) \omega.$$

Из диаграммы на рис. 2-58 видно, что зона действия реле, удовлетворяющая (2-48), ограничена двумя углами:

$$\varphi_1 = -(\pi - \psi_y) \text{ и } \varphi_2 = +(\pi - \psi_y).$$

Область работы такого реле характеризуется неравенством

$$-(\pi - \psi_y) < \psi < (\pi - \psi_y) \quad (2-49)$$

и показана на рис. 2-59, а.

Если принять $\psi_y = \pi/2$, то область действия реле будет ограничена прямой линией, совпадающей с осью x (рис. 2-59, б), и будет соответствовать характеристике реле направления мощности.

Структурная схема. На рис. 2-60, а и б показаны структурная схема и диаграмма работы реле, действующего на принципе измерения времени совпадения знаков напряжений U_I и U_{II} ,

подведенных к реле. Напряжения U_I и U_{II} подаются на схему совпадения 1, определяющую время t_c совпадения положительных мгновенных значений U_I и U_{II} за положительный полупериод U_I .

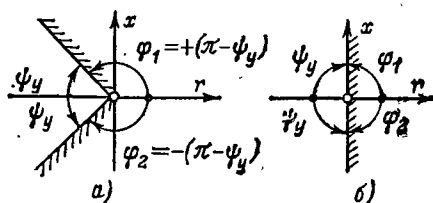


Рис. 2-59. Зоны действия реле.

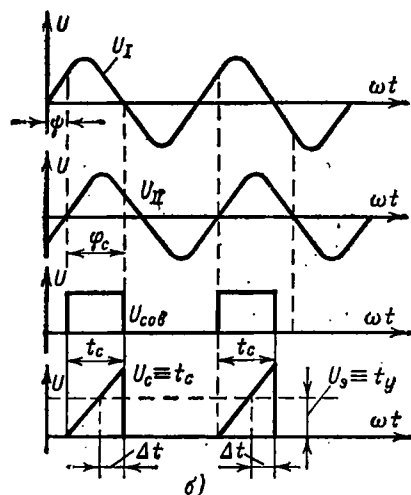
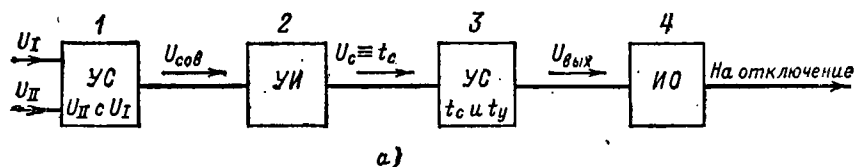


Рис. 2-60. Структурная схема реле на совпадение знаков мгновенных значений U_I и U_{II} (а); диаграмма работы реле (б).

результатирующее напряжение $U_{\text{вых}}$, подаваемое на исполнительный орган 4. Значение и знак $U_{\text{вых}}$ зависят от разности $U_c - U_y$. При $U_c > U_y$, чему соответствует условие $t_c > t_y$, исполнительный орган срабатывает. При $U_c < U_y$ (т. е. при $t_c < t_y$) реле не действует.

На выходе схемы 1 получаются прямоугольные импульсы напряжения $U_{\text{сов}}$ (рис. 2-60, б), длительность каждого импульса равна t_c .

Непосредственное сопоставление времени t_c и t_y согласно (2-48) оказывается сложным, поэтому вместо t_c и t_y сравниваются пропорциональные им напряжения U_c и U_y . Напряжение $U_c \equiv t_c$ получается с помощью интегрирующей схемы 2 (представляющей собой контур RC), на выходе которой возникает напряжение U_c треугольной формы, пропорциональное t_c .

Напряжение U_c сравнивается с эталонным напряжением $U_y \equiv t_y$ в устройстве 3, на выходе которого появляется резу-

Схема реле направления мощности. В качестве примера на рис. 2-61 приведена схема реле направления мощности [Л. 44, 45], работающего на рассмотренном принципе по структурной схеме рис. 2-60, а.

Устройство реле. Чтобы получить реле направления мощности, сравниваются напряжения $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$ с $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$, где $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$ — напряжение и ток сети. Напряжение $\dot{U}_p$ подводится к промежуточному трансформатору TP_1 , а ток $\dot{I}_p$ — к трансформатору TP_2 . Трансформатор TP_1 и трансформатор TP_2 служат для получения напряжений $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$ и $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$. Положительные полуволны напряжений U_I и U_{II} через выпрямители D_1, D_2 подаются на базы транзисторов T_1 и T_2 и управляют их работой.

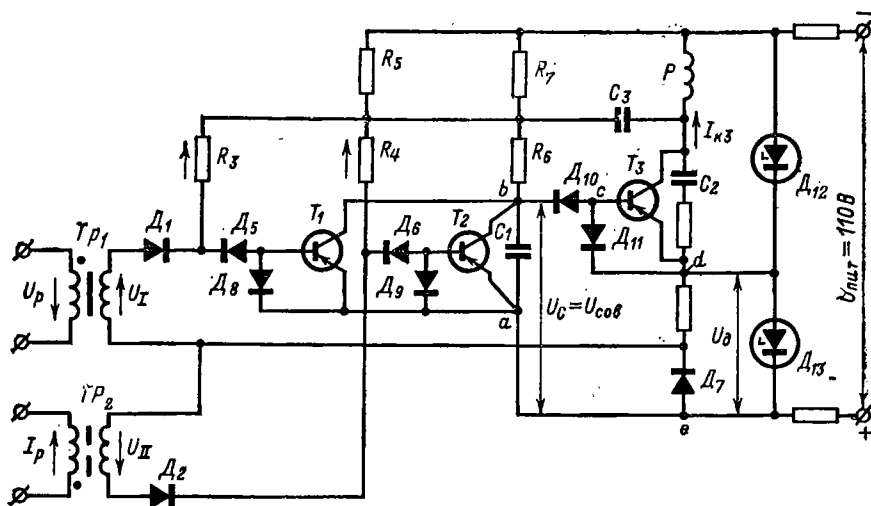


Рис. 2-61. Реле направления мощности на сравнении знаков мгновенных величин $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Транзисторы T_1 и T_2 образуют схему совпадения. Их эмиттеры и коллекторы включены параллельно. При отсутствии положительных напряжений U_I и U_{II} на базе транзисторов T_1 и T_2 каждый из них открыт отрицательным потенциалом, поступающим по R_3 и R_4 , и поэтому напряжение между входными зажимами a и b схемы совпадения равно нулю. Появление положительной полуволны напряжения U_I или U_{II} на одном из триодов закрывает его, но поскольку второй триод открыт, выходное напряжение остается равным нулю, и только одновременное поступление положительных полуволн U_I и U_{II} на оба транзистора T_1 и T_2 приводит к одновременному закрытию их и появлению напряжения $U_{сов}$ на выходных зажимах a и b схемы совпадения. Напряжение имеет формы прямоугольных импульсов неизменной амплитуды. Продолжительность импульса равна t_c .

Конденсатор C_1 и сопротивление $R = R_6 + R_7$ образуют интегрирующий элемент. Конденсатор C_1 нормально зашунтирован транзисторами T_1 и T_2 и начинает заряжаться только в период времени t_c совпадения положительных значений U_I и U_{II} . В течение этого времени напряжение на конденсаторе парастает от 0 до $U_C \equiv t_c$, как показано на рис. 2-60, б. При заряде

конденсатора напряжение меняется по закону $U_C = U_{\text{пит}} \left(1 - e^{-\frac{t_c}{RC}}\right)$ или приближенно $U_C = \frac{U_{\text{пит}}}{RC} t_c$.

Управление транзистором T_3 происходит под влиянием разности потенциалов между точками b и d , равной $U_b - U_d$. Потенциал точки d задан и равен $U_d \equiv t_y$ (см. рис. 2-60, б). Это напряжение поддерживается постоянным с помощью стабилитронов D_{12} и D_{13} . Потенциал точки b определяется состоянием транзисторов T_1 и T_2 . Когда один или оба транзистора T_1 и T_2 открыты, то точка b имеет положительный потенциал, равный потенциалу точки e (при этом предполагается, что сопротивление открытого транзистора равно нулю). В этом случае $U_C = 0$, а $U_b > U_d$ и триод T_3 закрыт, так как разность $U_b - U_d$ имеет положительное значение. Когда транзисторы T_1 и T_2 закрываются, то вследствие заряда конденсатора C_1 напряжение U_C на его зажимах (a и b) начинает расти, соответственно начинает уменьшаться потенциал точки b , который связан с U_C уравнением: $U_b = U_{\text{пит}} - U_C$. При $U_b < U_d$ транзистор T_3 и диод D_{10} открываются на время Δt (рис. 2-60) пока не откроется вновь транзистор T_1 или T_2 .

Зажимы эмиттера и коллектора T_3 зашунтированы конденсатором C_2 , которые обеспечивает работу реле P после кратковременного открытия транзистора T_3 . При открытии T_3 конденсатор C_2 шунтируется и мгновенно разряжается. Когда T_3 закроется, зарядный ток конденсатора C_2 , проходя через реле P , удерживает его в сработанном состоянии до поступления нового импульса, открывающего транзистор T_3 .

Работа реле. При совпадении положительных значений U_I и U_{II} транзисторы T_1 и T_2 закрываются одновременно на время t_c , в течение которого оба напряжения имеют положительный знак. В этот интервал времени t_c происходит заряд емкости C_1 . Если $t_c \geq t_y$, то потенциал точки b (U_b) станет меньше потенциала точки d (U_d). Транзистор T_3 откроется, и выходное реле P сработает. Принимая $t_y = T/4$ из (2-44), получим, что условием действия рассмотренного реле является неравенство $-90^\circ \leq \varphi_p \leq +90^\circ$; здесь учтено, что $\psi = \varphi_p$. Характеристика такого реле показана на рис. 2-59, б.

Реле с такой характеристикой является органом направления мощности синусного типа. Для получения косинусного или промежуточного реле необходимо соответствующим образом сместить по фазе U_I .

Реле, работающие на рассмотренном принципе, отличаются особым быстродействием, их время действия не превышает половины периода сравниваемых напряжений, так как время совпадения $t_c \leq \frac{T}{2}$.

г) Реле сравнения фаз на кольцевой фазочувствительной схеме

Устройство и принцип действия реле (рис. 2-62, а). Основным элементом фазосравнивающей схемы являются четыре выпрямителя 1, 2, 3, 4, соединенные последовательно по замкнутой кольцевой схеме. Сравнимые напряжения U_I и U_{II} подаются на кольцевую схему к точкам AC и BD соответственно.

Исполнительный орган P подключен к средним точкам m и n делителей напряжения R_I и R_{II} . В качестве исполнительного органа P используется любое чувствительное реле, реагирующее на полярность постоянного тока, в том числе и магнитоэлектрическое реле.

Выпрямители в данной схеме выполняют роль коммутационных устройств (переключателей), открывающих путь току

в реле P . Работа выпрямителей (т. е. их открытие и закрытие) в каждый момент времени определяется большим из двух подведенных к ним напряжений U_I и U_{II} . Поэтому большее напряжение является управляющим. Меньшее напряжение, называемое управляемым или изменяемым, питает ток исполнительный орган реле P через выпрямители, открываемые управляющим напряжением. При такой схеме среднее значение тока в исполнительном органе P $I_p = I_{cr}$ зависит от угла сдвига фаз ψ между U_I и U_{II} , т. е. $I_p = I_{cr} = f(\psi)$.

Сказанное подтверждается приводимым ниже анализом работы реле.

Работа реле (рис. 2-62). Примем, что напряжение U_{II} опережает по фазе U_I на угол ψ и что $U_I \gg U_{II}$. Последнее позволяет с некоторым приближением считать $U_I > U_{II}$ в любой момент времени.

Для уяснения работы реле необходимо определить токораспределение в схеме, обусловленное напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, и установить зависимость тока I_p в исполнительном органе реле от ψ .

Воспользуемся для этого методом наложения, который позволяет находить токи, рассматривая действие каждой э. д. с. $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$

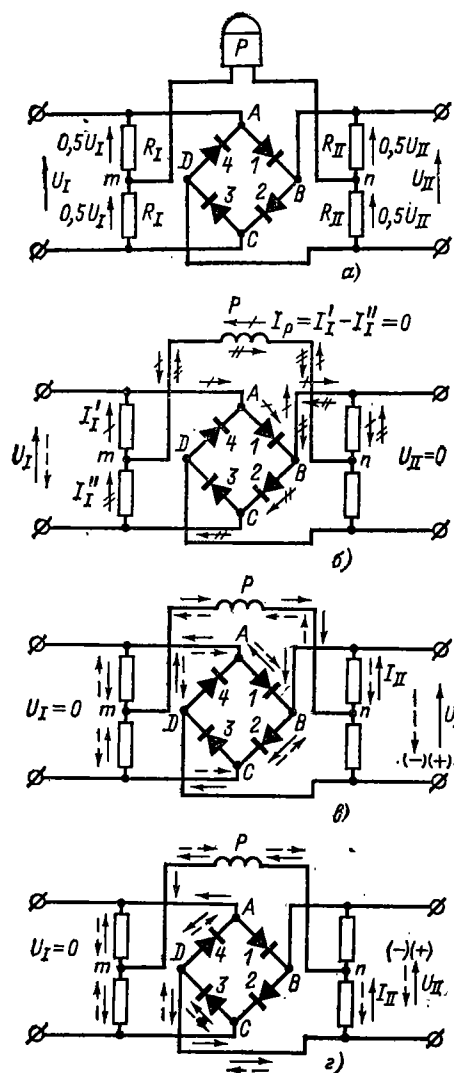


Рис. 2-62. Реле сравнения фаз с помощью кольцевой фазочувствительной схемы.

а — принципиальная схема; б — токораспределение под действием напряжения U_I ; в — токораспределение под действием напряжения U_{II} при открытых диодах 1 и 2; г — то же при открытых диодах 3 и 4.

независимо от другой¹. Полные токи находятся наложением токов от U_I и от U_{II} .

Сначала рассмотрим токи, возникающие под действием напряжения U_I при $U_{II} = 0$.

В положительный полупериод U_I (рис. 2-62, б) выпрямители 1 и 2 открываются, а 3 и 4 закрываются, так как управляющее напряжение U_I приложено к первым — в прямом, а ко вторым — в обратном направлении, что видно из рис. 2-62, а, где стрелкой показано положительное направление U_I . Под действием U_I возникают два тока I'_I и I''_I (рис. 2-62, б). Ток I'_I замыкается по контуру $mABnPt$, а ток I''_I — по контуру $mPnBCt$. Оба тока равны, так как напряжение и сопротивления контуров одинаковы. В реле P эти токи направлены встречно и взаимно компенсируются. Поэтому любое управляющее напряжение, в том числе и U_I , тока в реле P не создает. Токи, обусловленные напряжением U_I , замыкаются по открытым выпрямителям 1 и 2.

Теперь рассмотрим токораспределение от меньшего напряжения U_{II} при $U_I = 0$ (рис. 2-62, в), считая, что выпрямители 1 и 2 открыты. Под влиянием U_{II} возникает ток I_{II} . Положительный ток I_{II} изображен на рисунке сплошными стрелками. Он проходит по выпрямителям 1 и 2, открытым управляющим напряжением U_I , по обеим половинкам делителя R_I и по обмотке реле P , как показано на рис. 2-62, в. Напряжение U_{II} не может создать тока положительного знака на нижней половине сопротивления R_{II} (рис. 2-62, а и б), так как выпрямители 3 и 4 закрыты напряжением U_I и меньшее напряжение U_{II} их открыть не может.

Ток I_{II} отрицательного знака, появляющийся в отрицательный полупериод U_{II} , показан пунктирными стрелками. Он проходит по тому же пути, что и положительный ток I_{II} , но противоположен ему по направлению. С учетом, что U_I тока в реле не дает, ток, полученный от U_{II} , является током, п и т а ю щ и м исполнительный орган P , при этом положительный и отрицательный ток направлены в реле противоположно.

Кривая тока в реле за положительный полупериод U_I показана на рис. 2-63, б; при этом учтено, что U_I отстает от U_{II} на угол ψ , и принято, что ток I_{II} совпадает по фазе с U_{II} , так как в контуре, по которому циркулирует I_{II} , преобладает активное сопротивление.

Следует заметить, что в токораспределении на рис. 2-62, в положительный ток I_{II} проходит по выпрямителю 1 и отрицательный ток I_{II} — по выпрямителю 2 в обратном для него направлении.

Можно условно считать, что сопротивление открытого диода равно нулю как для прямого, так и для обратного тока.

Физически ток через выпрямитель может проходить только в прямом направлении. В действительности в контуре тока I_{II} на рис. 2-62, в (контур

¹ Метод наложения применим только для линейных цепей, поэтому полупроводниковые диоды в схеме реле должны условно рассматриваться как линейные сопротивления.

$nBA\mu Pn$) действуют не одно (как условно рассматривалось по методу наложения), а одновременно два встречно направленных напряжения: $0,5U_I$ и $0,5U_{II}$. Создаваемый ими действительно идущий через выпрямитель I ток

$$I = \frac{0,5U_I - 0,5U_{II}}{R_K}, \quad (2-50)$$

где R_K — сопротивление контура, в котором открытый выпрямитель I учтен сопротивлением прямого направления.

Ток I проходит по выпрямителю I в прямом направлении, поскольку $U_I > U_{II}$ и, следовательно, разность $0,5(U_I - U_{II})$ положительна.

Из (2-50) видно, что ток I можно рассматривать состоящим из двух составляющих:

$$I_I = \frac{0,5U_I}{R_K} \text{ и } I_{II} = \frac{0,5U_{II}}{R_K}.$$

Эти составляющие получаются и при применении метода наложения, как это было показано в приведенном выше рассмотрении. Ток I_I положи-

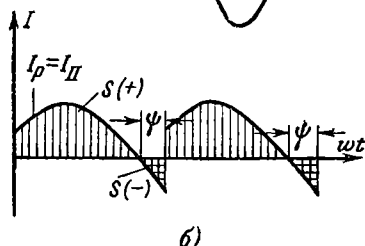
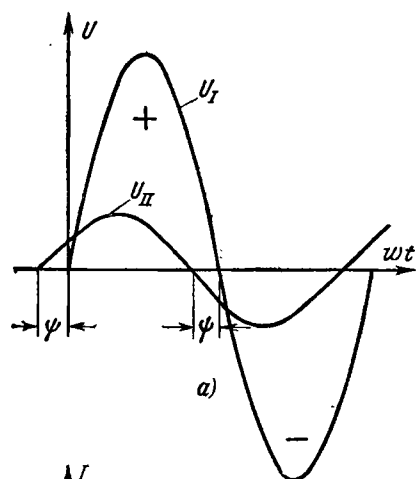


Рис. 2-63. Кривые напряжений U_I и U_{II} и соответствующего им тока в исполнительном органе P .

риода U_I идут в реле P в одном положительном направлении. Соответственно совпадают отрицательные и положительные токи I_{II} . С учетом этого на рис. 2-63, б построена кривая тока I_{II} в реле P для отрицательного полупериода U_I .

тетен, а ток I_{II} отрицателен. Это означает, что I_I проходит через выпрямитель I в прямом направлении, а I_{II} — в обратном. Такое представление и принято в приведенном рассмотрении, оно является условным (математическим) и вытекает из метода наложения. Наложение фиктивных токов $+I_{II}$ и $-I_{II}$ дает действительный ток I . Аналогичным образом объясняется прохождение в обратном направлении тока I_{II} по выпрямителю 2.

Во втором, отрицательном полупериоде U_I (рис. 2-62, г) выпрямители 1 и 2 закрываются, а выпрямители 3 и 4 открываются. Под действием U_{II} через открывшиеся выпрямители 3 и 4 пойдет ток I_{II} , так же как и в предыдущем случае, замыкаясь через обмотку исполнительного органа — реле P .

Из токораспределений на рис. 2-62, в и г видно, что положительный ток I_{II} в течение положительного полупериода U_I и отрицательный ток I_{II} во время отрицательного полупе-

Исполнительный орган P реагирует на знак среднего значения тока I_{II} :

$$I_{IIcp} = \frac{S_{(+)} - S_{(-)}}{T/2}, \quad (2-51)$$

где $S_{(+)} - S_{(-)}$ — разность площадей положительного и отрицательного знака ограниченных кривой тока I_{II} (рис. 2-63) за полупериод напряжения $U_I (T/2)$.

Если за полупериод преобладает положительный ток I_{II} (т. е. $S_{(+)} > S_{(-)}$), то реле работает; при преобладании отрицательной составляющей ($S_{(-)} > S_{(+)}$) реле не действует.

Соотношение площадей $S_{(+)}$ и $S_{(-)}$ зависит от угла сдвига фаз ψ между U_I и U_{II} , это видно из рис. 2-63. Границей действия реле будет $\psi \pm 90^\circ$, при этом $S_{(+)} = S_{(-)}$, а ток в реле $I_{IIcp} = 0$. Отсюда следует, что условие работы реле выражается неравенством

$$-90^\circ < \psi < +90^\circ. \quad (2-52)$$

При $\psi = 0$ ток I_{IIcp} достигает максимального значения, и, следовательно, реле имеет наибольшую чувствительность. К таким же выводам можно прийти аналитическим путем:

$$I_{IIcp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_{II} dt;$$

с учетом, что $I_{II} = I_{II m} \sin(\omega t - \psi)$,

$$I_{IIcp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_{II} \sin(\omega t - \psi) dt.$$

После преобразований получим:

$$I_{IIcp} = 0,9 I_{II} \cos \psi. \quad (2-53)$$

Найденное выражение подтверждает, что $I_{IIcp} = f(\psi)$ и что зона действия реле определяется (2-52).

При рассмотрении работы реле было принято, что $U_I \gg U_{II}$. В тех случаях, когда разница амплитуд U_I и U_{II} невелика, а $\psi \neq 0$, функции управляющего напряжения будут поочередно выполняться как U_I , так и U_{II} .

Это не меняет принципа работы реле, но затрудняет определения и расчет I_{cp} , поэтому в вышеприведенном анализе и было принято условие $U_I \gg U_{II}$.

Реле направления мощности. Если принять, что $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$, а $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$, то реле с кольцевой фазочувствительной схемой будет работать как реле направления мощности, так как оно будет реагировать на угол сдвига φ_p между током I_p и напряжением U_p сети. Как следует из (2-53), это будет реле косинусного типа (оно не действует при $\varphi_p = 90^\circ$ и имеет наибольшую чувствитель-

ность при $\varphi_p = 0$). Сдвигая искусственным путем фазу U_I или U_{II} , можно получить реле промежуточного и синусного типа.

Отечественная промышленность выпускает реле направления мощности на кольцевой схеме.

д) Общая оценка реле на сравнении фаз

Из принципа действия рассмотренных реле следует, что они срабатывают в течение первого полупериода тока к. з. В результате этого реле, работающее на сравнении фаз, отличаются большим быстродействием. Это порождает и недостаток. Работа таких быстродействующих реле может искажаться влиянием апериодической слагающей тока к. з., возникающей в переходных режимах, и гармонических составляющих в напряжениях U_I и U_{II} . Отстройка от помех является важной проблемой при конструировании реле, работающих на сравнении фаз.

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ

3-1. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА И ИХ ПОГРЕШНОСТИ

Трансформаторы тока являются очень важным элементом релейной защиты. Они питают цепи защиты током сети и выполняют роль датчика, через который поступает информация к измерительным органам устройств релейной защиты. От точности этой информации зависит надежная и правильная работа релейной защиты. Поэтому основным требованием к трансформаторам тока является точность трансформации с погрешностями, не превышающими допустимых значений. Принцип устройства трансформатора тока [Л. 19, 20, 89], схема его замещения и векторная диаграмма приведены на рис. 3-1. Напомним некоторые положения о работе трансформаторов тока и рассмотрим причины, вызывающие их погрешность.

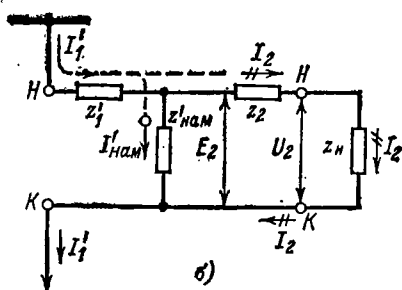
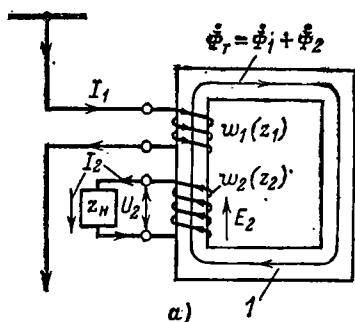
Принцип действия. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно в цепь контролируемого тока I_1 (рис. 3-1, а). Вторичная обмотка замыкается на сопротивление нагрузки z_n , состоящее из последовательно включенных реле и различных приборов.

Ток I_1 , проходящий по виткам первичной обмотки w_1 , и ток I_2 , индуцированный во вторичной обмотке w_2 , создают намагничивающие силы (н. с.), которые вызывают магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , замыкающиеся по стальному магнитопроводу l . Намагничивающие силы и создаваемые ими магнитные потоки геометрически складываются, образуя результирующую н. с. $I_{\text{нам}}w_1$ и результирующий магнитный поток трансформатора Φ_T :

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_{\text{нам}} w_1; \quad (3-1)$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_T. \quad (3-1a)$$

Поток Φ_T , называемый рабочим или основным, пронизывает обе обмотки и наводит во вторичной обмотке э. д. с. E_2 , которая создает в замкнутой цепи вторичной обмотки ток I_2 . Поток Φ_T создается н. с. $I_{\text{нам}} w_1$ и, следовательно, током $I_{\text{нам}}$. Последний



является частью тока I_1 и называется намагничивающим током. Вторая часть первичного тока $(I_1 - I_{\text{нам}})$ создает н. с., компенсирующую (уравновешивающую) н. с. вторичной обмотки $I_2 w_2$, что следует из (3-1) после его преобразования $(I_1 - I_{\text{нам}}) w_1 = -I_2 w_2$. Таким образом, можно считать что трансформация первичного тока I_1 осуществляется с помощью магнитного потока Φ_T и создающего его тока намагничивания $I_{\text{нам}}$.

Если принять $I_{\text{нам}} = 0$, то тогда уравнение (3-1) примет вид:

$$I_1 w_1 = -I_2 w_2, \text{ откуда} \\ I_2 = -I_1 \frac{w_1}{w_2} = -\frac{I_1}{n_B}, \quad (3-2)$$

где $n_B = w_2/w_1$ — коэффициент трансформации, называемый витковым, в отличие от номинального коэффициента трансформации n_T^* .

Выражение (3-2) показывает, что при отсутствии намагничивающего тока вторичный ток I_2 (расчетный ток) равен первичному

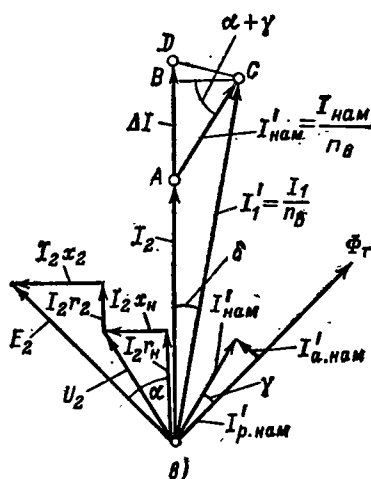


Рис. 3-1. Трансформатор тока.

а — принцип устройства; б — схема замещения; в — векторная диаграмма. В схеме замещения и векторной диаграмме принято, что первичный ток и сопротивление первичной обмотки приведены к числу витков вторичной обмотки и что вектор I_2 повернут на 180° по сравнению с его действительным направлением.

* Под номинальным коэффициентом трансформации подразумевается отношение номинального первичного тока трансформатора тока ко вторичному $n_T = I_{\text{ном}}/I_{2\text{ном}}$. В заводских материалах дается номинальный коэффициент трансформации, а не витковый. При $I_{\text{нам}} = 0$ $n_T = n_B$, поскольку согласно (3-2) $I_1/I_2 = w_2/w_1 = n_B$.

току I_1 , поделенному на коэффициент трансформации n_B и сдвинуто относительно первичного тока по фазе на 180° . В этом случае первичный ток полностью трансформируется во вторичную обмотку w_2 и трансформатор тока работает и д е а л ь н о без погрешностей и потерь.

Причины погрешности. В действительности ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ не может быть равен нулю, так как он создает рабочий магнитный поток Φ_T , который осуществляет трансформацию первичного тока во вторичную обмотку. При отсутствии тока $I_{\text{нам}}$, а следовательно, и потока Φ_T трансформация невозможна, так как во вторичной обмотке не будет наводиться э. д. с. E_2 и ток I_2 будет равен нулю. С учетом этого ток $I_{\text{нам}} \neq 0$ и тогда вторичный ток I_2 из уравнения (3-1) получается равным:

$$I_2 = (-I_1 + I_{\text{нам}}) \frac{w_1}{w_2} = - \left(\frac{I_1}{n_B} - \frac{I_{\text{нам}}}{n_B} \right). \quad (3-3)$$

Из выражения (3-3), следует, что *действительный вторичный ток отличается от расчетного значения, определенного по формуле (3-2), на величину $I_{\text{нам}}/n_B$, которая и вносит искажение в величину и фазу вторичного тока. Вследствие наличия тока намагничивания во вторичную обмотку трансформируется не весь первичный ток $\frac{I_1}{n_B}$, а только его часть $\left(\frac{I_1}{n_B} - \frac{I_{\text{нам}}}{n_B} \right) = \frac{I_1 - I_{\text{нам}}}{n_B}$.*

Таким образом, *причиной, вызывающей погрешность в работе трансформаторов тока, является ток намагничивания.*

Векторная диаграмма и виды погрешностей трансформаторов тока. Искажающее влияние тока намагничивания показано на векторной диаграмме рис. 3-1, в, в основу которой положена схема замещения (рис. 3-1, б). В схеме замещения магнитная связь между первичной и вторичной обмотками трансформатора тока заменена электрической, а все величины первичной стороны приведены к виткам вторичной обмотки.

Приведенный первичный ток $I'_1 = I_1/n_B$, приведенный ток намагничивания $I_{\text{нам}} = I_{\text{нам}}/n_B$.

За исходный при построении диаграммы принят вторичный ток I_2 .

Вторичное напряжение U_2 равно падению напряжения в сопротивлении нагрузки $z_H = r_H + jx_H$, т. е. $U_2 = \dot{I}_2 (r_H + jx_H)$. Вектор вторичной э. д. с. E_2 равен геометрической сумме напряжений U_2 и падения напряжения в сопротивлении вторичной обмотки $z_2 = r_2 + jx_2$, т. е.

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 (r_2 + jx_2),$$

или

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 (r_2 + r_H) + j\dot{I}_2 (x_2 + x_H) = \dot{I}_2 (z_2 + z_H) \quad (3-4)$$

и опережает I_2 на угол α .

С учетом условно принятых положительных направлений токов и э. д. с. в схеме замещения результирующий магнитный поток трансформатора тока Φ_T показан отстающим от создаваемой им э. д. с. E_2 на 90° . Намагничивающий ток трансформатора тока $I_{\text{нам}}$, создающий поток Φ_T , опережает последний на угол γ , обусловленный потерями в стали сердечника трансформатора тока. Приведенный первичный ток I'_1 (на основе схемы замещения) находится как сумма вторичного тока I'_2 и тока намагничивания $I'_{\text{нам}}$.

Векторная диаграмма показывает, что за счет тока $I'_{\text{нам}}$ вторичный ток получается меньше приведенного первичного тока $I'_1 = I_1/n_B$ на величину ΔI и смещается относительно него по фазе на угол δ .

Величина ΔI (отрезок AD на рис. 3-1, в) равна арифметической разности $(I'_1 - I'_2)$ и называется погрешностью по току. Она показывает, насколько действительный ток I_2 меньше расчетного вторичного тока $I_{2\text{расч}} = \frac{I_1}{n} = I'_1$, получаемого при идеальной трансформации.

Угол δ показывает, на сколько действительный вторичный ток I_2 сдвинут по фазе от расчетного тока I'_2 , равного приведенному значению первичного тока I'_1 , поэтому угол δ называется угловой погрешностью.

Абсолютное значение вектора тока намагничивания $I_{\text{нам}}$, равного геометрической разности вектора первичного тока I'_1 , приведенного ко вторичной стороне, и действительного вторичного тока I_2 , т. е. $|I_{\text{нам}}| = |I'_1 - I_2|$, называется полной погрешностью трансформатора тока. Из векторной диаграммы на рис. 3-1, в и приведенного ниже выражения (3-4а) следует, что полная погрешность $|I_{\text{нам}}|$ определяет и характеризует как погрешность по току ΔI , так и погрешность по углу δ . Угол δ очень мал, поэтому с некоторым приближением можно считать, что ΔI равен отрезку $\overline{AB}$, а угол δ , измеряемый в радианах длиной дуги $\overline{DC}$, равен отрезку $\overline{BC}$. С учетом этого из рассмотрения треугольника ABC

$$\left. \begin{aligned} \Delta I &= \overline{AB} = I'_{\text{нам}} \sin(\alpha + \gamma); \\ \delta_{\text{рад}} &= \overline{BC} = I'_{\text{нам}} \cos(\alpha + \gamma), \end{aligned} \right\} \quad (3-4a)$$

где α — угол сдвига фаз между $\dot{E}_2$ и $\dot{I}_2$, γ — между $\dot{I}_{\text{нам}}$ и $\dot{\Phi}$.

Из выражений (3-4а) следует, что с увеличением α , зависящего от угла Φ_n (угла сдвига тока $\dot{I}_2$ по отношению к напряжению $\dot{U}_2$) ΔI растет, а угол δ уменьшается. При $\alpha + \gamma = 90^\circ$ погрешность по току ΔI достигает максимального значения, угловая же погрешность становится минимальной $\delta = 0$.

Погрешность по току ΔI и полная погрешность $|\dot{I}_{\text{нам}}|$ обычно согласно ГОСТ выражается в относительных единицах или процентах, как отношение действующих значений этих погрешностей к действующему значению приведенного первичного тока I'_1 .

Относительная токовая погрешность

$$f_i \% = \frac{\Delta I}{I'_1} 100 = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} 100, \quad (3-5)$$

где I_2 — действительный вторичный ток, а $I'_1 = I_1/n_T$ — приведенный первичный ток.

Относительная погрешность f_i отрицательная, если $I_2 < I_1$.

Относительная полная погрешность обозначается буквой ε

$$\varepsilon \% = \frac{|\dot{I}_{\text{нам}}|}{|\dot{I}'_1|} 100 = \frac{|\dot{I}'_1 - I_2|}{|\dot{I}'_1|},$$

где $|\dot{I}_{\text{нам}}|$ и $|\dot{I}'_1|$ — действующие значения тока намагничивания и приведенного первичного тока.

В общем случае, если вторичный ток не синусоидален, то ток намагничивания выражается как среднее квадратичное значение разности мгновенных величин вторичного тока i_2 и приведенного первичного тока i'_1 за период T первичного тока:

$$I_{\text{нам}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(i_2 - \frac{i'_1}{n} \right)^2 dt},$$

тогда

$$\varepsilon \% = \frac{100}{I'_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(i_2 - \frac{i'_1}{n} \right)^2 dt}. \quad (3-5a)$$

В выражениях (3-5) и (3-5a) коэффициент трансформации n_T принимается равным номинальному коэффициенту трансформации. Погрешность по углу выражается в градусах и минутах, она считается положительной, если I_2 опережает I_1 , как показано на рис. 3-1, в. Относительные погрешности ε , ΔI и δ увеличиваются с увеличением тока намагничивания $I_{\text{нам}}$.

Чрезмерно большие погрешности могут вызвать неправильные действия устройства релейной защиты. Поэтому уменьшение погрешности трансформаторов тока является очень важной задачей, она сводится к уменьшению тока намагничивания трансформаторов тока¹.

¹ Следует отметить, что на практике значение тока I_2 подсчитывается без учета погрешностей по выражению (3-2), согласно которому $I_2 = I_1/n_T$. Это допустимо при малых значениях $I_{\text{нам}}$. Например, при токах I_1 , близких к номинальному, когда $I_{\text{нам}}$ составляет 0,5—3% расчетного тока I_2 . При больших кратностях первичного тока и особенно при насыщении магнитопровода $I_{\text{нам}}$ возрастает и расчет I_2 необходимо вести с учетом погрешностей по выражению (3-3).

3-2. ПАРАМЕТРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА УМЕНЬШЕНИЕ НАМАГНИЧИВАЮЩЕГО ТОКА

Ток намагничивания (рис. 3-1, е) состоит из составляющей $I'_{а. нам}$, обусловленной активными потерями на гистерезис и от вихревых токов в магнитопроводе трансформатора тока, и составляющей $I'_{р. нам}$, создающей магнитный поток Φ_T , который индуцирует во вторичной обмотке э. д. с. E_2 . Ток $I'_{р. нам} \gg I'_{а. нам}$.

Для уменьшения $I'_{а. нам}$ магнитопровод трансформатора тока выполняется из шихтованной стали, имеющей небольшие активные потери.

Для уменьшения второй составляющей $I_{р. нам}$ нужно уменьшать поток Φ_T , связанный с $I_{р. нам}$ известным соотношением

$$\Phi_T = \frac{I_{р. нам} w_1}{R_M},$$

откуда

$$I_{р. нам} = \frac{\Phi_T R_M}{w_1}, \quad (3-6)$$

где R_M — магнитное сопротивление стального сердечника I трансформатора тока.

Графически эта зависимость представляется характеристикой намагничивания, изображенной на рис. 3-2.

В начальной части характеристики ток намагничивания почти пропорционален Φ_T . При некотором значении потока $\Phi_T = \Phi'_T$ происходит насыщение магнитопровода, вследствие чего ток намагничивания возрастает значительно быстрее, чем поток Φ_T , что вызывает резкое увеличение погрешностей. Следовательно, для ограничения погрешностей нужно ограничивать величину магнитного потока Φ_T или магнитной индукции $B_T = \Phi_T/Q$, не допуская насыщения магнитопровода.

Из принципа работы трансформатора тока вытекает, что ток Φ_T должен иметь такую величину, при которой наведенная им вторичная э. д. с. E_2 была бы достаточной для компенсации падения напряжения в цепи вторичной обмотки. Как известно, поток Φ_T связан с наведенной им э. д. с. E_2 выражением

$$\Phi_T = \frac{E_2}{4,44 w_2 f \cdot 10^{-8}},$$

где согласно (3-4)

$$E_2 = I_2 (z_2 + z_H). \quad (3-7)$$

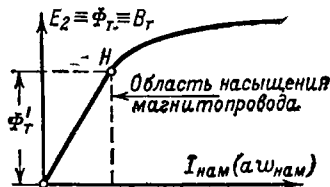


Рис. 3-2. Характеристика намагничивания трансформатора тока.

Поскольку вторичный ток $I_2 = I_1/n_T$, то с увеличением I_1 и z_H э. д. с. E_2 растет, а следовательно, растет магнитный поток Φ_T и намагничивающий ток $I_{\text{нам}}$.

Таким образом, для уменьшения Φ_T (а следовательно, и $I_{\text{нам}}$) нужно уменьшать E_2 , стремясь к тому, чтобы при максимальных значениях тока к. з. возникающий в трансформаторе поток Φ_T не насыщал магнитопровод. Уменьшение E_2 достигается уменьшением z_H и уменьшением вторичного тока I_2 путем повышения коэффициента трансформации трансформатора тока n_T , или иначе говоря, путем снижения кратности максимального первичного тока $I_{1\text{макс}}$, проходящего через трансформатор тока по отношению к его номинальному току $I_{1\text{ном}}$:

$$K_{1\text{макс}} = \frac{I_{1\text{макс}}}{I_{1\text{ном}}}.$$

Существенное влияние на величину намагничивающего тока оказывают конструктивные параметры.

Как вытекает из выражения (3-6), для уменьшения $I_{\text{р. нам}}$ необходимо уменьшать магнитное сопротивление R_m и увеличивать число витков первичной обмотки w_1 . Для уменьшения $R_m = l/\mu Q$ нужно увеличивать сечение стали магнитопровода Q , сокращать путь l , по которому замыкается поток Φ_T , и применять сталь с высокой магнитной проницаемостью μ , добиваясь увеличения прямолинейной части характеристики намагничивания трансформатора тока и ее крутизны.

В качестве дополнительной меры по повышению точности трансформаторов тока заводы-изготовители применяют компенсацию $I_{\text{нам}}$ уменьшением числа витков w_2 вторичной обмотки против расчетного значения $w_2 = w_1 n_T$. В результате этой коррекции вторичный ток I_2 увеличивается на 1—3%, компенсируя, таким образом, его уменьшение на 1—3% за счет $I_{\text{нам}}$. Такой способ дает результат при малых значениях $I_{\text{нам}}$, т. е. при токах, близких к номинальному. Следует заметить, что при коррекции витков витковый коэффициент трансформации становится меньше номинального: $n_B < n_T$.

Таким образом, для уменьшения погрешностей трансформатор тока должен иметь минимальную величину $I_{\text{нам}}$ и работать в прямолинейной части своей характеристики намагничивания. Это условие обеспечивается: а) конструктивными параметрами магнитопровода; б) правильным выбором нагрузки вторичной обмотки z_H и в) снижением величины вторичного тока за счет уменьшения кратности первичного тока $K_{1\text{макс}}$, что достигается выбором соответствующего коэффициента трансформации n_T . В процессе проектирования и эксплуатации электрических установок ограничение погрешностей трансформаторов тока возможно только за счет уменьшения кратности первичного тока $K_{1\text{макс}}$ и нагрузки вторичной обмотки z_H .

Погрешности трансформаторов тока резко возрастают в первый момент к. з., когда в первичном токе имеется апериодическая составляющая (см. § 10-3); это необходимо учитывать при расчете быстросрабатывающих защит.

3-3. ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА, ПИТАЮЩИХ РЕЛЕЙНУЮ ЗАЩИТУ

Трансформаторы тока, питающие релейную защиту, должны работать с определенной точностью в пределах значений токов к. з., на которые должна реагировать релейная защита. Эти токи, как правило, превышают номинальные токи трансформаторов тока $I_{1\text{ном}}$ и, следовательно, точная работа трансформаторов тока с погрешностью, не превосходящей определенного значения, должна обеспечиваться при первичных токах $I_1 > I_{1\text{ном}}$. На основании опыта эксплуатации и теоретического анализа принято, что для обеспечения правильной работы большинства устройств релейной защиты погрешность трансформаторов тока не должна превышать по току ΔI 10%, а по углу δ — 7°.

Эти требования обеспечиваются, если полная погрешность трансформаторов тока $\epsilon \leq 10\%$, или иначе говоря, если ток намагничивания не превосходит 10% от тока I_1 , проходящего по трансформатору тока, т. е. $I_{\text{нам}} \leq 0,1 I_1$. В § 3-2 было показано что погрешность трансформаторов тока зависит от кратности первичного тока $K_{1\text{макс}}$ и нагрузки вторичной обмотки $z_{\text{н}}$. Для каждого типа трансформатора тока имеются определенные значения $K_{1\text{макс}}$ и $z_{\text{н}}$, при которых погрешность ϵ будет равна 10%. Поэтому исходными величинами для оценки погрешности трансформаторов тока, применяемых для релейной защиты, является максимальный первичный ток $I_{1\text{макс}}$, при котором требуется точная работа и нагрузка вторичной обмотки $z_{\text{н}}$. Максимальный ток, при котором требуется точность трансформаторов тока, зависит от вида защиты. Для одних защит, например токовых максимальных с независимой характеристикой и для токовых отсечек этот ток $I_{1\text{макс}}$ равен их току срабатывания, для других — току к. з., проходящему через трансформаторы тока при к. з. в начале или конце защищаемой зоны. Нагрузка $z_{\text{н}}$ определяется конкретными условиями выполнения рассматриваемой защиты. Она складывается из сопротивления реле $z_{\text{р}}$ и сопротивления соединительных проводов $z_{\text{п}}$, которые для упрощения суммируются арифметически:

$$z_{\text{н}} = z_{\text{р}} + z_{\text{п}}.$$

Предельные значения $K_{1\text{макс}}$ и $z_{\text{н}}$ из условия 10%-ной погрешности должны давать заводы, изготавливающие трансформаторы тока.

Кроме релейной защиты трансформаторы тока питают измерительные приборы. Поэтому согласно ГОСТ 7746-68 точность работы трансформаторов тока характеризуется для измерительных

приборов классом точности, а для релейной защиты — предельной кратностью первичного тока $K_{10} = I_{1\text{макс}}/I_{1\text{ном}}$ и нагрузкой $z_{\text{н. доп}}$, при которых гарантируется, что полная погрешность трансформаторов тока ε не превысит 10%.

Погрешности классов точности устанавливаются, исходя из условий точной работы измерительных приборов, а погрешность при *предельной кратности тока K_{10} и нагрузке $z_{\text{н. доп}}$ в соответствии с требованиями, предъявляемыми релейной защитой.*

Класс точности. В СССР для промышленных установок изготавливаются трансформаторы тока классов: 0,5; 1; 3; 10 и Р или по старому ГОСТ Д.

Каждый класс точности характеризуется определенной погрешностью по току ΔI и углу δ , установленной ГОСТ 7746-68. Эти

Таблица 3-1

Класс	Погрешность по ГОСТ при номинальном токе	
	по току, %	по углу, мин
0,5	$\pm 0,5$	± 40
1	± 1	± 80
3	± 3	Не нормируется
Р	Не нормируется	

погрешности приведены в табл. 3-1, они обеспечиваются только при первичных токах I_1 в пределах от 0,1 до 1,2 номинального тока, т. е. в диапазоне токов нагрузки, контролируемой измерительными приборами. Трансформаторы тока класса Р предназначаются для релейной защиты и поэтому их погрешности при номинальных токах не нормируются. Работа трансформаторов тока с погреш-

ностью, соответствующей классу, обеспечивается при нагрузке вторичной обмотки, не выходящей за пределы н о м и н а л ь н о й.

Но м и н а л ь н о й нагрузкой трансформаторов тока называется максимальная нагрузка, при которой погрешность трансформаторов тока равна значению, установленному для данного класса (см. табл. 3-1). Номинальную нагрузку принято выражать в виде полной мощности $S_{\text{ном}}$ (В·А) при номинальном вторичном токе 5 или 1 А и $\cos \varphi = 0,8$, или в виде сопротивления нагрузки $z_{\text{н. ном}}$ (Ом). Номинальная мощность $S_{\text{н. ном}} = U_2 I_{2\text{ном}}$. Учитывая, что $U_2 = I_{2\text{ном}} z_{\text{н. ном}}$, получаем:

$$S_{\text{н. ном}} = I_{2\text{ном}}^2 z_{\text{н. ном}}. \quad (3-8)$$

Из (3-8)

$$z_{\text{н. ном}} = \frac{S_{\text{ном}}}{I_{2\text{ном}}^2}. \quad (3-8a)$$

В зависимости от конструкции и класса точности трансформатора тока значение номинальной нагрузки колеблется от 2,5 В·А до 100 В·А. При токах $I_1 > 1,2 I_{1\text{ном}}$ погрешности трансформаторов тока выходят за пределы, установленные для данного класса. Следует отметить, что *класс точности не может служить основанием для выбора трансформаторов тока, питающих защиту, так*

как предусматриваемые им погрешности относятся к номинальным токам, в диапазоне которых релейная защита не работает. Для релейной защиты, исходя из указанных выше требований к погрешностям трансформаторов тока, заводы, изготавливающие трансформаторы тока, должны согласно ГОСТ 7746-68 давать в своих информационных материалах перечисленные ниже данные.

1. Кривые предельной кратности K_{10} трансформаторов тока. Эти кривые приводятся в заводской информации для трансформаторов тока класса Р, предназначенных для релейной защиты. Кривые представляют собой зависимость максимальной кратности первичного тока $K_{10} = I_{1\text{ макс}}/I_{1\text{ ном}}$ от сопротивления нагрузки z_H , при которых полная погрешность $\varepsilon = 10\%$.

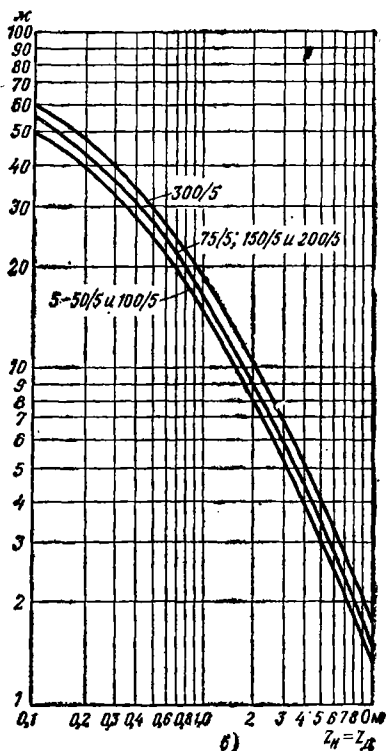
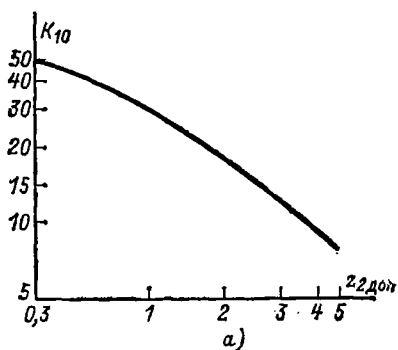


Рис. 3-3. Кривые для расчета погрешности трансформатора тока.

а — кривые предельной кратности тока $K_{10} = f(z_H)$; б — кривые 10%-ной погрешности трансформатора тока типа ТПФ на 6—10 кВ для сердечника класса 1.

Характер подобной зависимости $K_{10} = f(z_H)$ при $\varepsilon = 10\%$ приведен на рис. 3-3, а. При предельной кратности K_{10} и нагрузке z_H , соответствующей любой точке кривой $K_{10} = f(z_H)$, трансформаторы тока работают на перегибе характеристики намагничивания в точке Н (рис. 3-2 и 3-4), т. е. вблизи начала насыщения магнитопровода. Соответствующий этой точке ток $I_{\text{нас}}$ и является указанным выше предельным максимальным током $I_{1\text{ макс}}$.

Для трансформаторов тока класса Д, выполняемых по ГОСТ 7746-55, давались кривые 10%-ной погрешности $m_{10} = f(z_H)$. Эти кривые (рис. 3-3, б) определяют аналогичную предыдущей зависимости предельной кратности первичного тока

$m_{10} = f(z_H)$, но при условии, что 10%-ная погрешность по току равна ΔI , а не ε . Однако для релейной защиты определяющей является полная погрешность $\varepsilon = I_{\text{нам}}/I_1$. Поэтому в новом ГОСТ 7746-68 вместо зависимости $m_{10} = f(z_H)$ при $\Delta I = 10\%$, приводится зависимость $K_{10} = f(z_H)$ при $\varepsilon = 10\%$.

2. Номинальная предельная кратность $K_{10 \text{ ном}}$ трансформаторов тока. Согласно ГОСТ 7746-68 значение $K_{10 \text{ ном}}$ приводится

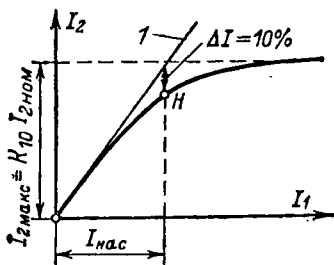


Рис. 3-4. Зависимость вторичного тока трансформатора тока от первичного.

1 — вторичный ток идеального трансформатора тока $I_2 = I_1 n_T$;
2 — действительный вторичный ток.

сечение магнитопровода Q , сопротивление вторичной обмотки r_2 . Эти данные должны приводиться в заводской информации для всех трансформаторов тока. Пользуясь ими, можно определить при заданной кратности первичного тока $K_{1 \text{ макс}}$ значение $z_{H \text{ доп}}$, при котором $\varepsilon = 10\%$, или 20, 30% и т. д.

в информационных материалах заводов для трансформаторов тока всех классов. Под этой величиной подразумевается кратность $K_{10 \text{ ном}} = I_{1 \text{ макс}}/I_{1 \text{ ном}}$, при которой полная погрешность ε при номинальной нагрузке $z_{H \text{ ном}}$ не превышает 10%. На основании этих данных можно считать, что если действительная кратность $K \leq K_{10 \text{ ном}}$ и действительная нагрузка $z_H \leq z_{H \text{ ном}}$, то $\varepsilon \leq 10\%$.

3. Типовые кривые намагничивания $B_m = f\left(\frac{I_{\text{ном}} \omega_2}{l}\right)$ и параметры

трансформаторов тока: номинальное число витков ω_2 вторичной обмотки, средняя длина магнитного пути l ,

3-4. ВЫБОР ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ДОПУСТИМОЙ ВТОРИЧНОЙ НАГРУЗКИ

Исходя из тока нагрузки защищаемого элемента, его рабочего напряжения и вида защиты, выбирают тип трансформатора тока и его номинальный коэффициент трансформации, после чего проводится проверка на термическую и динамическую стойкость.

Для дифференциальных и других защит, требующих точной работы трансформатора тока при больших кратностях первичного тока, выбирают трансформаторы тока класса Р (Д). Для защит, требующих точной работы трансформаторов тока при меньших значениях первичного тока $I_{1 \text{ макс}}$, можно выбирать трансформаторы классов 1, 3 и 10. По сравнению с трансформаторами тока класса Р эти трансформаторы насыщаются при меньших кратностях тока.

Выбранные таким образом трансформаторы тока проверяют на точность работы, обеспечивающую правильное действие питающейся от них релейной защиты. Проверка сводится к определению действительной нагрузки z_H и сопоставлению ее с $z_{H \text{ доп}}$. Для

этой цели определяют максимальную кратность $K_{1\text{макс}}$ и, пользуясь указанными выше данными заводов-изготовителей, находят допустимое сопротивление вторичной нагрузки $z_{\text{н. доп}}$, при котором погрешность трансформаторов тока не превышает 10%. Действительная нагрузка $z_{\text{н}}$ должна удовлетворять условию: $z_{\text{н}} \leq z_{\text{н. доп}}$. При выполнении этого условия погрешность трансформаторов тока в установленном режиме не будет превышать заданной, т. е. 10%.

Выбор $z_{\text{н}}$ по кривым предельной кратности $K_{10} = f(z_{\text{н}})$.

Этот метод является самым простым и им следует пользоваться как основным методом расчета точности работы трансформаторов тока класса Р. Выбор производится в следующем порядке:

а) Находят максимальный первичный ток $I_{1\text{макс}}$, при котором погрешность ε не должна превышать 10%.

б) Вычисляют максимальную кратность первичного тока по формуле

$$K_{10\text{макс}} = \frac{k_a I_{1\text{расч}}}{\alpha I_{1\text{ном}}}, \quad (3-9)$$

где k_a — коэффициент, учитывающий влияние аperiodической составляющей тока к. з. на работу трансформаторов тока в переходном режиме, k_a принимается равным 1,2—2; для защит, не подверженных влиянию переходных процессов (имеющих выдержку времени или включаемых через БНТ), $k_a = 1$;

α — коэффициент, учитывающий возможное отклонение действительной характеристики намагничивания данного трансформатора тока от типовой. Коэффициент α принимается равным 0,8—0,9.

в) По заводской кривой $K_{10} = f(z_{\text{н}})$ (рис. 3-3, а) определяется $z_{\text{н. доп}}$ для вычисленного значения $K_{10\text{макс}}$.

г) Определяется действительное сопротивление нагрузки $z_{\text{н}}$ с учетом сопротивления проводов и реле и проверяется, что $z_{\text{н}} \leq z_{\text{н. доп}}$. Если $z_{\text{н}} > z_{\text{н. доп}}$, то увеличивается коэффициент трансформации n_t выбираемого трансформатора тока, или выбирается трансформатор тока, у которого при $K_{10\text{макс}}$ допускается большее значение $z_{\text{н. доп}}$, или принимаются меры к уменьшению $z_{\text{н}}$.

2. Выбор $z_{\text{н}}$ по кривым 10%-ной погрешности для трансформаторов тока класса Д, изготовленных по старому ГОСТ 7746-55. Расчет ведется аналогично предыдущему случаю: определяется $I_{1\text{макс}}$, $m_{10\text{макс}} = \frac{I_{1\text{макс}}}{I_{1\text{ном}}}$ и затем по кривой $m_{10} = f(z_{\text{н}})$ находится допустимая нагрузка $z_{\text{н. доп}}$. Зависимость $m_{10} = f(z_{\text{н}})$ дается заводами для случая, когда сумма углов $\alpha + \gamma = 90^\circ$.

При этом, как это следует из диаграммы на рис. 3-1, а и уравнения (3-4а), погрешность по току ΔI имеет максимальное значение, а по углу δ минимальное. В действительности $\alpha + \gamma < 90^\circ$ и поэтому фактическая погрешность $\Delta I < 10\%$, а $\delta > 0$, но меньше 7° .

3. Выбор $z_{\text{н}}$ по типовой кривой намагничивания, представляющей зависимость максимальной индукции в сердечнике B_m от действующего значения напряженности магнитного поля $H = \frac{I_{\text{нам}} \omega a}{l}$ (А/см). Расчет ведется по данным информационного материала завода о значениях $B_{\text{пр}}$, Q , l , ω . Так же

как и в предыдущем случае сначала определяют максимальный первичный ток $I_{1\text{макс}}$, при котором необходимо обеспечить $\varepsilon = 10\%$. Затем находят ток $I_{\text{на}10}$ при $\varepsilon = 10\%$, из уравнения $I_{\text{на}10} = \varepsilon I_{2\text{макс}}$, здесь $I_{2\text{макс}} = I_{1\text{макс}}/n_T$.

По найденному значению $I_{\text{на}10}$, по типовой характеристике намагничивания $B_m = f(aw_{\text{уд}})$ определяют B_{m10} , а затем находят E_2 , наводимую во вторичной обмотке при B_{m10} $E_{210} = 4,44 B_{m10} Q w_2 f$. Зная E_{210} , определяют $z_{\text{н,доп}}$, при котором $\varepsilon = 10\%$. Считая, что сопротивлением вторичной обмотки можно пренебречь, получают:

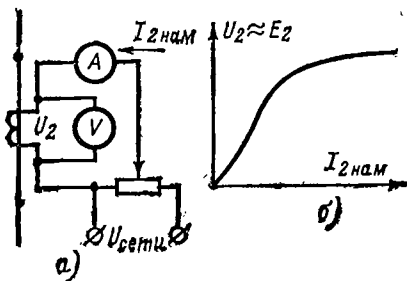


Рис. 3-5. Зависимость вторичного напряжения от тока намагничивания.

а — схема снятия характеристики; б — зависимость $U_2 = f(I_{\text{на}m})$.

опытным путем по схеме, приведенной на рис. 3-5, а. Меняя напряжение U_2 на зажимах вторичной обмотки, измеряют соответствующий каждому значению U_2 ток во вторичной обмотке, который является током намагничивания $I_{2\text{нам}}$. На основании полученных данных строится зависимость $U_2 = f(I_{2\text{нам}})$ (рис. 3-5, б).

Вследствие малой величины сопротивления вторичной обмотки z_2 принимается, что $U_2 \approx E_2$, и тогда полученная характеристика может рассматриваться как зависимость $E_2 = f(I_{2\text{нам}})$.

На основании этой характеристики можно определить значение E_2 , при котором наступает насыщение, и, пользуясь формулой (3-7), вычислить допустимую нагрузку при заданном токе к. з.

Вторичный ток. Трансформаторы тока выполняются со вторичным номинальным током 5 и 1 А. Мощность нагрузки $S_H = I_2^2 z_H$. Поэтому одноамперный трансформатор тока может нести нагрузку в 25 раз большую, чем пятиамперный, имеющий те же конструктивные параметры.

Приведенные методы расчета допустимой нагрузки трансформаторов тока из условия 10%-ной погрешности пригодны для установившегося режима. В переходном режиме апериодическая составляющая тока к. з. намагничивает сердечник трансформатора тока, что приводит к резкому увеличению $I_{\text{на}m}$, а следовательно и, увеличению погрешности трансформатора тока. Учет влияния апериодической составляющей увеличением в 2 раза расчетного значения максимальной кратности тока введением коэффициента k_a в уравнение (3-9) не дает гарантии сохранения требуемого уровня погрешности в переходном режиме. Исследования и опыты показывают, что в переходном режиме трансформаторы тока с нагрузкой и кратностью $K_{1\text{макс}}$, обеспечивающей в установив-

$$z_H = \frac{E_{210}}{0,9 I_{2\text{макс}}};$$

здесь коэффициент 0,9 учитывает уменьшение вторичного тока I_2 на величину принятой погрешности 10%. Задаввшись другим значением ε , например 20%, можно таким же путем найти $z_{\text{н,доп}}$.

Выбор z_H по характеристике $U_2 = f(I_{\text{на}m})$. При отсутствии сведений о погрешности трансформатора тока его пригодность для данной защиты и допустимая нагрузка вторичной цепи z_H могут быть приближенно оценены по характеристике зависимости вторичного тока намагничивания $I_{2\text{нам}}$ от вторичного напряжения U_2 . Характеристика снимается

шемся режиме $\varepsilon = 10\%$, могут иметь погрешность, доходящую до 70—80%.

Имеется ряд предложений по расчету погрешностей в переходном режиме, но все они еще не применяются в повседневной практике ввиду их сложности и приближенности [Л. 88].

3-5. ОБОЗНАЧЕНИЕ ВЫВОДОВ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И ВЕКТОРНЫЕ ДИАГРАММЫ

Обозначение выводов. При изготовлении трансформаторов тока выводы их первичной и вторичной обмоток условно обозначаются (маркируются) так, чтобы при помощи этих обозначений можно было определять направление вторичного тока по направлению первичного.

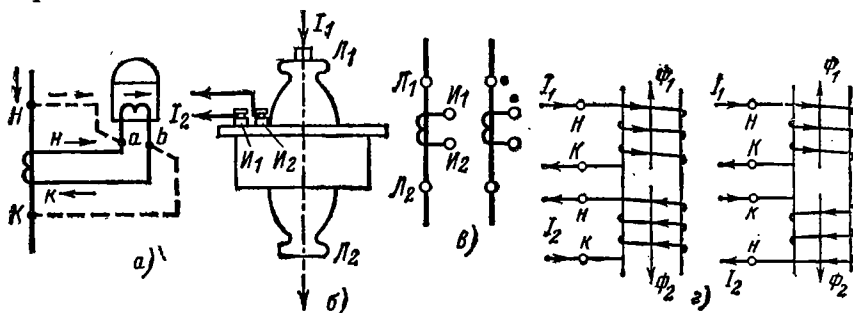


Рис. 3-6. Обозначение выводов обмоток трансформатора.

α — правило маркировки выводов; б — обозначения выводов на трансформаторе; в — обозначение на схемах; г — направление вторичного тока от направления намотки витков вторичной обмотки.

Выводы первичной обмотки могут обозначаться произвольно: один из них принимается за начало H , а второй — за конец обмотки K (рис. 3-6, а). Маркировка же выводов вторичной обмотки выполняется по следующему правилу.

При прохождении тока в первичной обмотке от начала H к концу K за начало вторичной обмотки и принимается тот ее вывод, из которого в этот момент ток вытекает в цепь нагрузки (рис. 3-6, а). Соответственно второй вывод вторичной обмотки принимается за конец обмотки K .

При обозначении выводов вторичной обмотки по указанному выше правилу ток в обмотке реле, включенного во вторичную цепь трансформатора тока, имеет такое же направление, как и в случае включения реле непосредственно в первичную цепь (рис. 3-6, а).

В СССР принято обозначать начало и конец первичной обмотки трансформаторов L_1 и L_2 , а начало и конец вторичной обмотки H_1 и H_2 (рис. 3-6, в).

Пользуясь указанными обозначениями выводов, производят включение обмоток реле направления мощности, ваттметров и

некоторых других приборов и выполняют соединения вторичных обмоток трансформаторов тока в заданные схемы. Обозначение одноименных выводов на схемах показано на рис. 3-6, в.

На рис. 3-6, г показаны направление вторичного тока и маркировка выводов при одинаковом и различном направлениях намотки витков первичной и вторичной обмоток при условии, что первичный ток в обоих случаях направлен от *Н* к *К*. Направления потока Φ_1 и вторичного тока определяются по правилу буравчика.

Изображение векторов вторичных токов. Направление векторов вторичного тока I_2 на диаграмме зависит от положительного

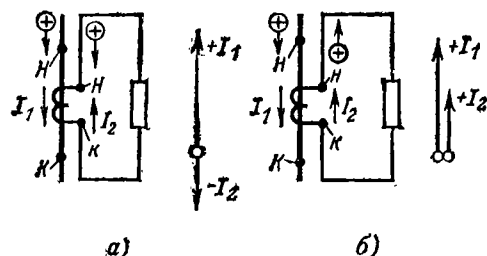


Рис. 3-7. Изображение векторов вторичного тока.

направления тока, принятого для вторичной обмотки. Если положительное направление вторичного и первичного токов принято совпадающим, например направленным от начала к концу (рис. 3-7, а), то при прохождении по первичной обмотке тока положительного направления вторичный ток будет иметь отрицательный знак

и изобразится на векторной диаграмме вектором, противоположным вектору первичного тока. Если же принять за положительное направление вторичного тока ток, обратный первичному (рис. 3-7, б), проходящий от конца к началу вторичной обмотки, то знаки первичного тока и соответствующего ему вторичного тока будут одинаковы, а их векторы будут совпадать. Второй способ удобнее первого, так как он позволяет при построении векторных диаграмм вторичные и первичные токи считать совпадающими. Поэтому он принимается в дальнейшем изложении.

В рассмотренных построениях погрешность трансформаторов тока не учитывается.

3-6. НОВЫЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПЕРВИЧНОМ ТОКЕ

Рост мощности электростанций и энергосистем приводит к увеличению токов к. з., а увеличение единичных мощностей генераторов вызывает увеличение времени затухания аperiodических составляющих тока к. з. Для крупных генераторов постоянная времени приближается к 0,3 с. Одновременно с этим вследствие роста энергосистем и сооружения мощных электропередач сверхвысокого напряжения повышаются требования к быстродействию защит. Появляются измерительные органы защит, действующие в течение первого полупериода к. з., т. е. тогда, когда аperiodическая составляющая тока к. з. еще не затухает.

Увеличение кратности первичного тока при к. з. и постоянной времени затухания апериодической составляющей существенно ухудшает работу трансформаторов тока, вызывая их насыщение в переходных режимах и, как следствие этого, искажение трансформации первичного тока, что создает опасность ложной работы быстродействующих защит. Одновременно с этим из-за роста рабочего напряжения увеличиваются размеры и стоимость трансформатора тока. В настоящее время уже сооружены линии электропередачи 750 кВ, а в ближайшем будущем появятся линии передачи 1200 кВ. Наличие указанных недостатков у обычных электромагнитных трансформаторов тока побуждает искать более точные и дешевые способы информации о первичном токе для устройств релейной защиты. Разработка новых способов ведется в двух направлениях.

Первое направление заключается в попытке усовершенствования электромагнитных трансформаторов тока:

а) Предлагается применять трансреакторы, т. е. трансформаторы тока с воздушным зазором в стальном магнитопроводе (см. § 2-16).

Трансреактор преобразует первичный ток I_1 во вторичную э. д. с. $E_2 \equiv I_1$, он имеет, в отличие от обычного трансформатора тока, линейную зависимость вторичной э. д. с. от первичного тока и в меньшей мере насыщается под действием апериодической составляющей, но такая конструкция обладает тем же недостатком, что и трансформатор тока в части размеров и стоимости при увеличении рабочего напряжения.

б) Разрабатываются электромагнитные датчики, называемые магнитными трансформаторами тока (МТТ). Вторичная обмотка 2 МТТ располагается вдали от токоведущих частей на стальном сердечнике 1 и не требует специальной изоляции от высокого напряжения (рис. 3-8, а). Первичный ток I_1 , протекая по проводу, создает магнитное поле. Часть силовых линий этого поля замыкается по сердечнику 1, индуцируя э. д. с. $E_2 \equiv I_1$. Размеры и стоимость такого устройства значительно меньше, чем у обычных трансформаторов тока, но его мощность невелика около 0,5 Вт.

Вторым направлением, принципиально новым, является применение датчиков первичного тока удаленных от токоведущих частей на расстоянии, не требующее специальной изоляции от первичной цепи. Связь между датчиком и приемником, питающим защиту, осуществляется с помощью особых (неэлектрических) каналов. Принцип выполнения подобных устройств изображен на рис. 3-8, б. Измеряемый первичный ток I_1 преобразуется с помощью преобразователя — передатчика 1 в сигнал С, который по каналу 2, не имеющему электрической связи с токопроводом первичной цепи, передается на приемник 3. В приемнике 3 полученный сигнал преобразуется в электрический ток I_2 , питающий защиту 4. Этот ток пропорционален первичному току по величине

и совпадает с ним по фазе. В качестве сигнала и соответствующего канала используются: высокочастотный сигнал, радиосигнал, оптический сигнал. Сигналы имеют специальный код, характеризующий значение и фазу первичного тока. Передатчик имеет потенциал первичного тока, а приемник располагается на земле и имеет нулевой потенциал. При таком устройстве отпадают проблемы высоковольтной изоляции. Подобные устройства обладают

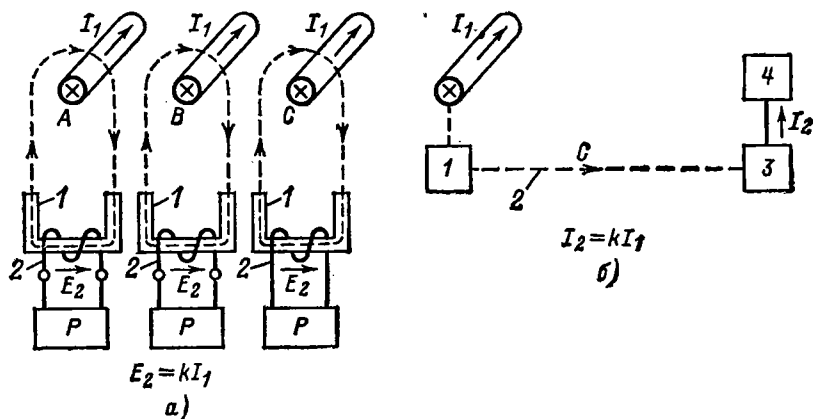


Рис. 3-8. Новые принципы преобразователей тока для релейной защиты.

а — магнитные трансформаторы тока (МТТ); А, В, С — провода линии; Р — реле;
 б — принципиальная схема датчиков тока с неэлектрическим каналом связи.

высокой точностью. Но отдаваемая ими мощность значительно меньше мощности трансформатора тока. Новые датчики тока находятся в стадии разработки и опытной проверки. Практическое применение возможно только в части магнитного трансформатора тока, который изготавливается в комплексе с токовой защитой Рижским опытным заводом Латвэнерго [Л. 108].

3-7. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

а) Типовые схемы и их анализ

Питание устройств релейной защиты током сети производится по рассмотренным ниже типовым схемам соединений трансформаторов тока и обмоток реле. Поведение и работа реле в каждой из этих схем зависят от характера распределения токов в ее вторичных цепях в нормальных и аварийных условиях.

Для нахождения токораспределения в схеме сначала показываются положительные направления действующей величины первичных токов при рассматриваем-

мом виде к. з.; затем наносятся стрелки вторичных токов в каждом трансформаторе тока, по которому проходит первичный ток, после чего показывается путь, по которому замыкается вторичный ток каждого трансформатора тока. Если в каком-либо элементе схемы (проводе или обмотке реле) вторичные токи разных фаз складываются или вычитаются, то результирующий ток в этом элементе находится путем геометрического сложения или вычитания соответствующих векторов фазных токов с учетом их сдвигов по фазе.

Для каждой схемы соединений можно определить отношение тока в реле I_p к току в фазе I_ϕ . Это отношение называется коэффициентом схемы

$$k_{сх} = \frac{I_p}{I_\phi}. \quad (3-10a)$$

Коэффициент схемы учитывается при расчете уставок и оценке чувствительности защиты.

Ниже рассмотрены основные типовые схемы, анализируется токораспределение в них и определяется их область применения.

б) Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду

Трансформаторы тока устанавливаются во всех фазах. Вторичные обмотки трансформаторов тока и обмотки реле соединяются в звезду и их нулевые точки связываются одним проводом, называемым нулевым (рис. 3-9). В нулевую точку объединяются одноименные зажимы обмоток трансформаторов тока.

При нормальном режиме и трехфазном к. з., как показано на рис. 3-9, в реле I, II и III проходят токи фаз

$$I_a = \frac{I_A}{n_T}, \quad I_b = \frac{I_B}{n_T}, \quad I_c = \frac{I_C}{n_T},$$

а в нулевом проводе — их геометрическая сумма

$$I_{н.п} = (I_a + I_b + I_c), \quad (3-11)$$

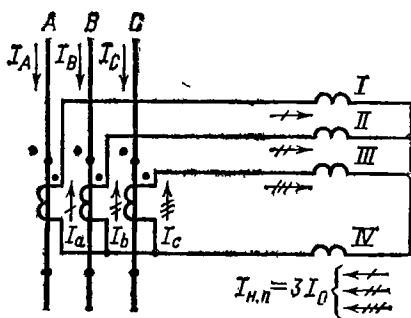


Рис. 3-9. Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в звезду.

которая при симметричных режимах равна нулю (как при наличии, так и отсутствии заземления в точках Н и К, рис. 3-10, а).

При двухфазном к. з. ток к. з. проходит только в двух поврежденных фазах и соответственно в реле, подключенных к трансформаторам тока поврежденных фаз (рис. 3-10, б), ток в неповрежденной фазе отсутствует. Согласно закону Кирхгофа

сумма токов в узле равна нулю, следовательно, $\dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, отсюда $\dot{I}_C = -\dot{I}_B$.

С учетом этого на векторной диаграмме токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ показаны сдвинутыми по фазе на 180° (рис. 3-10, б).

Ток в нулевом проводе схемы равен сумме токов двух поврежденных фаз ($\dot{I}_b$ и $\dot{I}_c$), но так как последние равны и противо-

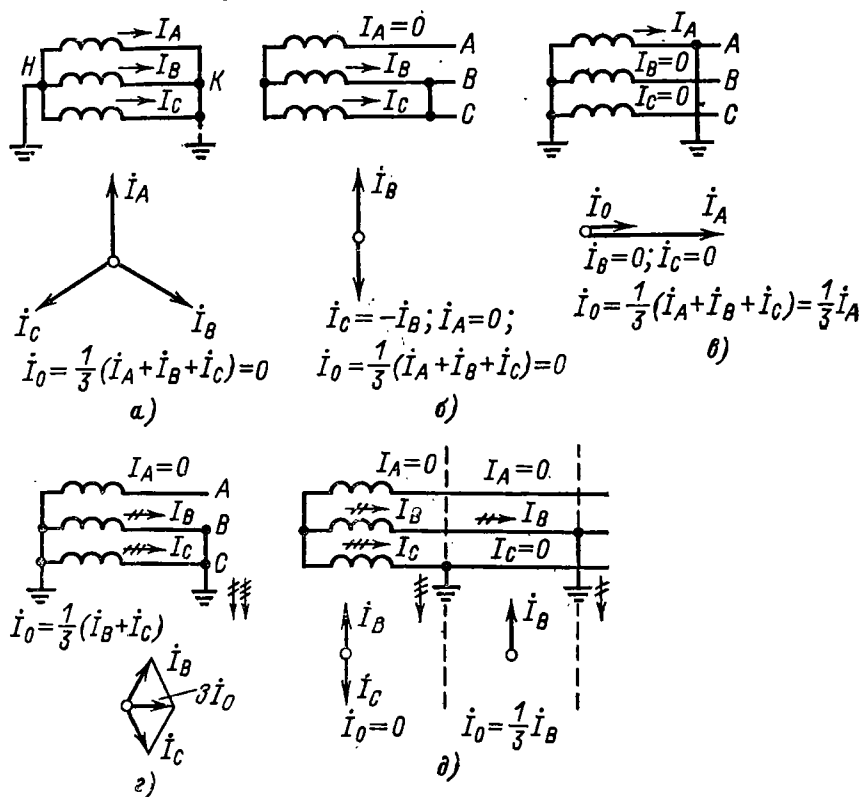


Рис. 3-10. Векторная диаграмма токов.

а — при трехфазном к. з.; б — при двухфазном к. з.; в — при однофазном коротком замыкании; г — при двухфазном к. з. на землю; д — при двойном замыкании на землю в разных точках.

положны по фазе (рис. 3-10, б), то ток в нулевом проводе также отсутствует: $I_{н.п} = \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$.

Поэтому реле IV , включенное в нулевой провод, не будет реагировать на нагрузку и междуфазные к. з., в чем состоит важная особенность схемы звезды.

В действительности в результате неидентичности характеристик и погрешностей трансформаторов тока сумма вторичных токов в обоих случаях отличается от нуля. В нулевом проводе проходит некоторый остаточный ток, называемый

мый током небаланса $I_{н.п} = I_{нб}$. При нормальном режиме ток небаланса равен примерно 0,01—0,2 А. При к. з. в связи с увеличением токов намагничивания ток небаланса возрастает.

При однофазных к. з. первичный ток к. з. проходит только по одной поврежденной фазе (рис. 3-10, в). Соответствующий ему вторичный ток проходит также только через одно реле и замыкается по нулевому проводу.

При двухфазных к. з. на землю (рис. 3-10, г) ток проходит в двух реле, включенных на поврежденные фазы (например, В и С). В нулевом проводе проходит геометрическая сумма этих токов, всегда отличная от нуля, что следует из их векторной диаграммы.

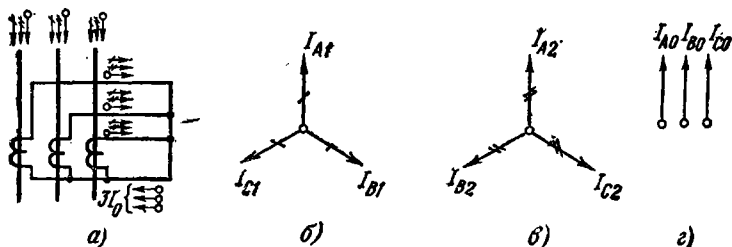


Рис. 3-11. Прохождение токов симметричных составляющих в схеме звезды.

а — токораспределение в схеме; б — г — векторы токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

При двойном замыкании на землю в разных точках прохождение токов в сети показано на рис. 3-10, д. На участке между местами замыкания на землю условия аналогичны однофазному к. з., а между источником питания и ближайшим к нему местом повреждения они соответствуют двухфазному к. з.

Нулевой провод схемы звезды является фильтром токов нулевой последовательности. Ток $I_{н.п}$ определяется по (3-11). Токи прямой и обратной последовательностей, как видно из рис. 3-11, а, в нулевом проводе не проходят, так как векторы каждой из этих систем дают в сумме нуль (рис. 3-11, б и в). Токи же нулевой последовательности (рис. 3-11, г) совпадают по фазе, и поэтому в нулевом проводе проходит утроенное значение этого тока $I_{н.п} = 3I_0$.

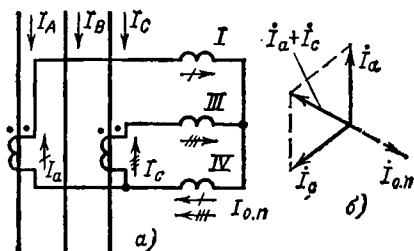
При нарушении (обрыве) вторичной цепи одного из трансформаторов тока в нулевом проводе возникает ток, равный току фазы, что может привести к непредусмотренному действию реле, установленного в нулевом проводе.

В рассмотренной схеме реле, установленные в фазах, реагируют на все виды к. з., а реле в нулевом проводе — только на к. з. на землю. Схема соединения в звезду применяется в защитах,

действующих при всех видах к. з. Ток в реле равен току в фазе, поэтому коэффициент схемы, определяемый выражением (3-11), $k_{сх} = 1$.

в) Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду

Трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах и соединяются так же, как и в схеме звезды (рис. 3-12, а). В реле I и III проходят токи соответствующих фаз



$$I_a = \frac{I_A}{n_T} \quad \text{и} \quad I_c = \frac{I_C}{n_T},$$

а в обратном проводе ток равен их геометрической сумме:

$$I_{o.n} = -(I_a + I_c). \quad (3-11a)$$

Рис. 3-12. Схема соединения трансформаторов тока и обмоток реле в неполную звезду.

С учетом векторной диаграммы — $(I_a + I_c) = I_b$, т. е. $I_{o.n}$ равен току фазы, отсутствующей во вторичной цепи (рис. 3-12, б).

При трехфазном к. з. и нормальном режиме токи проходят по обоим реле I и III и в обратном проводе. В случае двухфазного к. з. токи появляются в одном или двух реле (I или III) в зависимости от того, какие фазы повреждены.

Ток в обратном проводе при двухфазных к. з. между фазами A и C, в которых установлены трансформаторы тока, согласно рис. 3-10, б с учетом, что $I_c = -I_a$, равен нулю, а при замыканиях между фазами AB и BC он соответственно [см. уравнение (3-11a)] равен $I_{o.n} = -I_a$ и $I_{o.n} = -I_c$.

В случае однофазного к. з. фаз (A или C), в которых установлены трансформаторы тока, во вторичной обмотке трансформатора тока и обратном проводе проходит ток к. з. При замыкании на землю фазы B, в которой трансформатор тока не установлен, токи в схеме защиты не появляются; следовательно, схема 'неполной звезды реагирует не на все случаи однофазного к. з. и поэтому применяется только для защит, действующих при междуфазных повреждениях. Коэффициент схемы $k_{сх} = 1$.

г) Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а. обмоток реле в звезду

Вторичные обмотки трансформаторов тока, соединенные последовательно разноименными выводами (рис. 3-13), образуют треугольник.

Реле, соединенные в звезду, подключаются к вершинам этого треугольника. Из токораспределения на рис. 3-13 видно, что в каждом реле проходит ток, равный геометрической разности токов двух фаз:

$$\dot{I}_I = \frac{\dot{I}_A}{n_T} - \frac{\dot{I}_B}{n_T}; \quad \dot{I}_{II} = \frac{\dot{I}_B}{n_T} - \frac{\dot{I}_C}{n_T}; \quad \dot{I}_{III} = \frac{\dot{I}_C}{n_T} - \frac{\dot{I}_A}{n_T}.$$

На основании этих выражений и с учетом векторных диаграмм токов $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ (рис. 3-10) находятся токи, проходящие в реле при разных видах к. з.

При симметричной нагрузке и трехфазном к. з. в реле проходит линейный ток, в $\sqrt{3}$ раз больший тока фазы и сдвинутый относительно него по фазе на 30° (рис. 3-14).

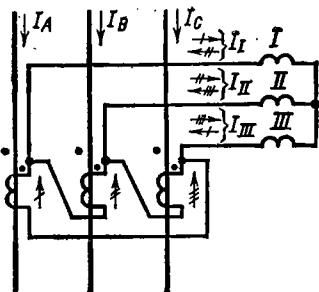


Рис. 3-13. Схема соединения трансформаторов тока в треугольник, а обмоток реле — в звезду.

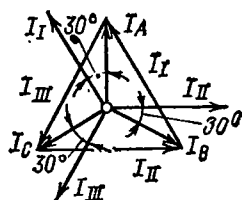


Рис. 3-14. Векторная диаграмма вторичных токов в схеме на рис. 3-13.

В табл. 3-2 приведены значения токов при других видах к. з. в предположении, что коэффициент трансформации трансформаторов тока равен единице ($n_T = 1$).

Таким образом, *схема соединения трансформаторов тока в треугольник обладает следующими особенностями:*

1. Токи в реле проходят при всех видах к. з., и, следовательно, защиты по такой схеме реагируют на все виды к. з.
2. Отношение тока в реле к фазному току зависит от вида к. з.
3. Токи нулевой последовательности не выходят за пределы треугольника трансформаторов тока, не имея пути для замыкания через обмотки реле.

Отсюда следует, что *при к. з. на землю в реле попадают только токи прямой и обратной последовательностей*, т. е. только часть тока к. з.

Описанная выше схема применяется в основном для дифференциальных и дистанционных защит.

Вид короткого замыкания	Поврежденные фазы	Токи в фазах	Токи в реле		
			I $i_A - i_B$	II $i_B - i_C$	III $i_C - i_A$
Двуфазное	A, B	$I_B = -I_A$ $I_C = 0$	$2I_A$	I_B	$-I_A$
	B, C	$I_C = -I_B$ $I_A = 0$	$-I_B$	$2I_B$	I_C
	C, A	$I_A = -I_C$ $I_B = 0$	I_A	$-I_C$	$2I_C$
Однофазное	A	$I_A = I_K$ I_A и $I_C = 0$	I_A	0	$-I_A$
	B	$I_B = I_K$ I_A и $I_C = 0$	$-I_B$	I_B	0
	C	$I_C = I_K$ I_A и $I_B = 0$	0	$-I_C$	I_C

Поскольку в рассматриваемой схеме ток в реле при трехфазных симметричных режимах в $\sqrt{3}$ раз больше тока в фазе, коэффициент схемы согласно (3-10) равен:

$$K_{сх}^{(3)} = \frac{I_p}{I_\Phi} = \frac{\sqrt{3}I_\Phi}{I_\Phi} = \sqrt{3}.$$

д) Схема соединений с двумя трансформаторами тока и одним реле, включенным на разность токов двух фаз

Трансформаторы тока устанавливаются в двух фазах (например, A и C на рис. 3-15); их вторичные обмотки соединяются разноименными зажимами, к которым (параллельно вторичным обмоткам) подключается обмотка реле.

Из токораспределения, показанного на рис. 3-15 для случая, когда по первичной цепи проходят положительные токи I_A , I_B , I_C , находим, что ток в реле I_p равен геометрической разности токов двух фаз I_a и I_c , т. е.

$$I_p = I_a - I_c, \quad (3-12)$$

где

$$I_a = \frac{i_A}{n_T}, \quad \text{а} \quad I_c = \frac{i_C}{n_T}.$$

Ток в реле для различных случаев к. з. и нагрузки находится с учетом прохождения первичных токов при рассматриваемом режиме по выражению (3-12) с помощью векторных диаграмм токов I_a и I_c .

При симметричной нагрузке и трехфазном к. з. распределение первичных и вторичных токов соответствует рис. 3-15. Пользуясь векторной диаграммой на рис. 3-10, а, находим по (3-12), что $I_a - I_c$ в $\sqrt{3}$ раз больше тока в фазе (I_a и I_c) и, следовательно,

$$I_p^{(3)} = \sqrt{3} I_\phi. \quad (3-12a)$$

При двухфазном к. з. на фазах А и С (рис. 3-10, б) в реле поступает два тока I_A и I_C с учетом векторной диаграммы $I_C = -I_A$; следовательно, и $I_c = -I_a$. Подставляя это значение I_c в (3-12), получаем:

$$I_p^{(2)} = 2I_a = 2I_\phi, \quad (3-12б)$$

где $I_\phi = I_a$.

При двухфазном к. з. между А и В или В и С в реле поступает ток только одной фазы I_A или I_C , поскольку на фазе В нет трансформатора тока; отсюда по (3-12) получим:

$$I_p^{(2)} = I_\phi, \quad (3-12в)$$

где $I_\phi = I_a$ или $I_\phi = I_c$.

Из (3-12а) — (3-12в) видно, что ток в реле, а следовательно, и чувствительность схемы при разных видах к. з. будут различными. Наименьший ток I_p , и поэтому наихудшая чувствительность будет при к. з. между двумя фазами (АВ и ВС), из которых одна фаза (В) не имеет трансформатора тока.

По сравнению со схемой полной и двухфазной звезды данная схема имеет худшую чувствительность при к. з. между АВ и ВС. Действительно, при одной и той же нагрузке линии $I_\phi = I_n$, в первых двух схемах в реле будет поступать ток $I_p = I_n$, а в рассматриваемой схеме согласно (3-12а) $I_p = \sqrt{3} I_n$.

В соответствии с этим ток срабатывания $I'_{c.p}$ реле в рассматриваемой схеме будет в $\sqrt{3}$ раз больше, чем $I'_{c.p}$ в первых двух: $I'_{c.p} = \sqrt{3} I'_{c.p}$. В то же время при двухфазном к. з. между фазами АВ и ВС в реле всех трех сравниваемых схем ток $I_p = I_\phi = I_K^{(2)}$; следовательно, если для схем по рис. 3-9 и 3-12 $k_\alpha = I_K^{(2)} / I'_{c.p}$, то для схемы по рис. 3-15

$$k_\alpha = \frac{I_K^{(2)}}{I'_{c.p}} = \frac{I_K^{(2)}}{\sqrt{3} I'_{c.p}}$$

и будет в $\sqrt{3}$ раз меньше. Указанный недостаток (пониженная

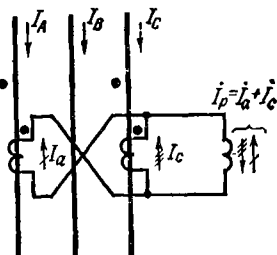


Рис. 3-15. Схема соединения трансформаторов тока на разность токов двух фаз.

чувствительность при двухфазных к. з. на линии между фазами AB и BC) нужно учитывать при применении схемы.

В случае двухфазного к. з. между фазами B и C за силовым трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник ток в реле $\dot{I}_p = \dot{I}_a - \dot{I}_c$ оказывается равным нулю, так как токи $\dot{I}_a$ и $\dot{I}_c$ равны по величине и совпадают по фазе, что видно из токораспределения на рис. 3-17. Таким образом, при этом случае повреждения реле не будет действовать, что является существенным недостатком схемы. По этой причине *однорелейную схему нельзя применять для защит, которые должны действовать при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток λ/Δ .*

В случае однофазных к. з. на фазе, не имеющей трансформаторов тока (фаза B), ток в реле равен нулю, поэтому схема с включением на разность токов двух фаз не может использоваться в качестве защиты от однофазных к. з.

Рассматриваемая схема может применяться только для защиты от междуфазных к. з. в тех случаях, когда она обеспечивает необходимую чувствительность при двухфазных к. з. и когда не требуется ее действие при к. з. за трансформатором с соединением обмотки λ/Δ .

Коэффициент схемы при симметричных режимах $K_{сх}^{кз} = \frac{I_p}{I_\phi} = \sqrt{3}$, с учетом что в этом режиме $I_p = \sqrt{3}I_\phi$.

е) Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности

Трансформаторы тока устанавливаются на трех фазах, одноименные зажимы вторичных обмоток соединяются параллельно и к ним подключается обмотка реле P (рис. 3-16).

Из показанного на схеме распределения токов следует, что ток в реле равен геометрической сумме вторичных токов трех фаз:

$$I_p = I_a + I_b + I_c.$$

Это значит, что $I_p = 3I_0$, следовательно, рассмотренная схема является фильтром токов нулевой последовательности. Ток в реле появляется только при однофазных и двухфазных к. з. на землю, так как только при этих

Рис. 3-16. Схема соединения трансформаторов тока в фильтр токов нулевой последовательности.

повреждениях появляется I_0 . Поэтому схема применяется для защит от замыканий на землю.

При нагрузках, трехфазных и двухфазных к. з. сумма первичных токов трех фаз равна нулю, соответственно ток $I_0 = 0$ и реле

P не действует. Но из-за погрешности трансформаторов тока сумма вторичных токов не балансируется и в реле появляется ток небаланса $I_{\text{нб}}$, что необходимо учитывать при применении схемы.

Включение реле по схеме на рис. 3-16 равносильно его включению в нулевой провод звезды по рис. 3-9.

Рассмотренная схема часто называется **трехтрансформаторным фильтром токов I_0** .

ж) Анализ работы схем соединений трансформаторов тока при двухфазных к. з. за трансформаторами с соединением обмоток звезда — треугольник

Особым случаем по характеру токораспределения являются двухфазные к. з. за трансформаторами с соединением обмоток λ/Δ или Δ/λ .

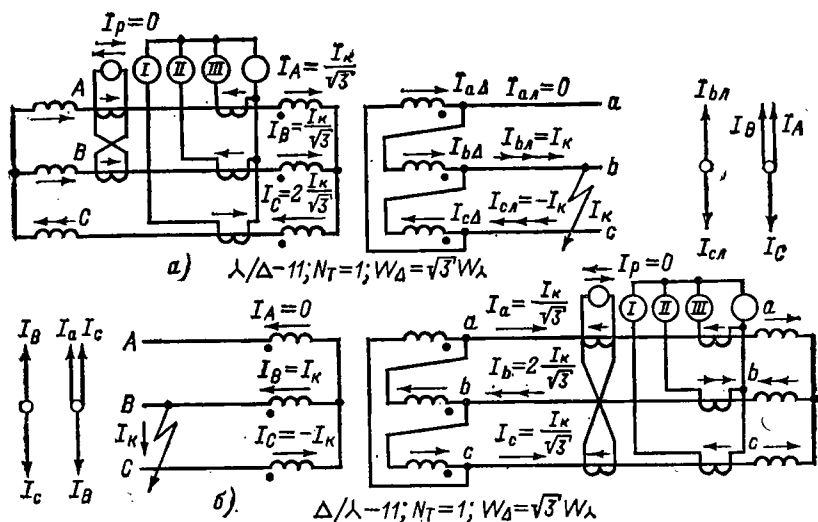


Рис. 3-17. Токораспределения и векторные диаграммы токов при двухфазных к. з. за трансформаторами с соединением обмоток.

а — λ/Δ ; б — Δ/λ .

Токораспределение на стороне звезды трансформатора с соединением обмоток λ/Δ (рис. 3-17, а) при к. з. на стороне Δ . Для простоты принимается, что коэффициент трансформации трансформатора $N_T = 1$. При этом отношение линейных токов обмоток, соединенных в λ и Δ , равно 1, а токов в фазах

$$\frac{I_{\lambda}}{I_{\Delta}} = \frac{w_{\Delta}}{w_{\lambda}} = \sqrt{3}. \quad (3-13)$$

При двухфазном к. з. на стороне треугольника, например между фазами b и c (рис. 3-17, a), ток в неповрежденной фазе $I_a = 0$, а токи в поврежденных фазах b и c равны току к. з., т. е.

$$I_c = -I_b = I_K.$$

Как видно из рис. 3-17, a , в треугольнике ток I_K делится на две части: одна замыкается по обмотке фазы c и другая — по последовательно включенным обмоткам фаз b и a . Спротивление второй цепи в 2 раза больше, чем первой. Поэтому ток в обмотке фазы c равен $\frac{2}{3} I_K$, а в обмотках a и b — $\frac{1}{3} I_K$.

Токи на стороне звезды соответствуют токам в обмотках одноименных фаз треугольника и превышают их с учетом (3-13) в $\sqrt{3}$ раз. Из рис. 3-17, a следует:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= I_{a\Delta} \sqrt{3} = \frac{I_K}{3} \sqrt{3} = \frac{I_K}{\sqrt{3}}; \\ I_B &= I_{b\Delta} \sqrt{3}; \quad I_C = I_{c\Delta} \sqrt{3} = \frac{2}{\sqrt{3}} I_K. \end{aligned} \right\} \quad (3-14)$$

При к. з. между фазами ab и ca картина распределения токов будет аналогичной.

Таким образом, при двухфазном к. з. на стороне треугольника трансформатора токи на стороне звезды появляются во всех трех фазах. В двух фазах они равны и одинаково направлены. В третьей фазе ток противоположен первым двум и равен их сумме, т. е. в 2 раза больше каждого из них.

Токо распределение на стороне треугольника при двухфазном к. з. за трансформатором с соединением обмоток Δ/Δ (рис. 3-17, b). Как следует из рис. 3-17, b , распределение и соотношение токов на стороне треугольника получается аналогично тому, как и в предыдущем случае на стороне звезды.

Анализ условий работы защиты, выполненный по схемам полной звезды, неполной звезды и с включением на разность токов в двух фазах в рассматриваемых условиях (т. е. при к. з. за трансформатором), показывает:

1) в схеме полной звезды (рис. 3-17) в одной фазе схемы появляется ток $2I_K/(\sqrt{3}n_T)$, где n_T — коэффициент трансформации трансформаторов тока, а в двух других $I_K/(\sqrt{3}n_T)$; сумма токов в нулевом проводе равна нулю. Реле I , II , III действуют, но два из них имеют в 2 раза меньшую чувствительность, чем третье реле;

2) в схеме неполной звезды (рис. 3-12) токи проходят по обеим фазам и обратному проводу, в последнем он равен геометрической сумме токов указанных фаз или току отсутствующей в схеме фазы.

Если трансформаторы тока окажутся на фазах с меньшими первичными токами $I_K/(\sqrt{3}n_T)$, то в таком случае условия чув-

ствительности будут в 2 раза хуже, чем в схеме полной звезды. Для устранения этого недостатка следует использовать реле в обратном проводе, где проходит сумма токов фаз, равная току к. з. в третьей фазе (см. § 3-6, в):

$$I_{0.п} = \frac{I_K}{\sqrt{3} n_T} + \frac{I_K}{\sqrt{3} n_T} = \frac{2I_K}{\sqrt{3} n_T};$$

3) в схеме с включением одного реле на разность токов двух фаз ток в реле в случае, показанном на рис. 3-17, а и б, будет отсутствовать.

Вследствие одинакового направления токов по фазам, на которых установлены трансформаторы тока, их разность и ток в реле равны нулю. Следовательно, эта схема не применима для защиты от к. з. за трансформаторами с соединением λ/Δ и Δ/λ .

3-8. НАГРУЗКА ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

Выше отмечалось, что погрешность трансформатора тока зависит от величины его нагрузки.

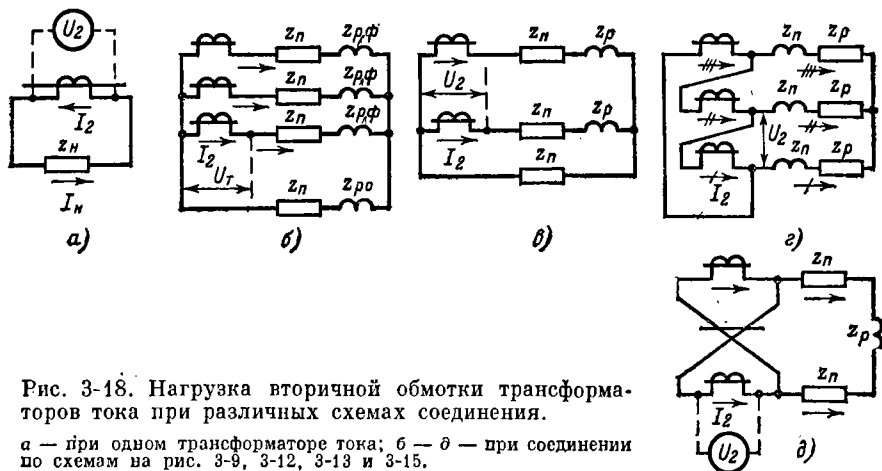


Рис. 3-18. Нагрузка вторичной обмотки трансформаторов тока при различных схемах соединения.

а — при одном трансформаторе тока; б — в — при соединении по схемам на рис. 3-9, 3-12, 3-13 и 3-15.

Сопротивление нагрузки трансформатора тока равно:

$$z_N = \frac{U_2}{I_2}, \quad (3-15)$$

где U_2 и I_2 — напряжение и ток вторичной обмотки (рис. 3-18, а).

Чтобы определить z_N , нужно вычислить напряжение U_2 , равное падению напряжения в сопротивлении нагрузки z_N от проходящего в нем тока I_N (рис. 3-18, а).

Сопротивление нагрузки состоит из сопротивления проводов r_n и сопротивления реле z_p , которые для упрощения суммируются арифметически: $z_N = r_n + z_p$.

Значение $U_2 = I_2 z_H$ (рис. 3-18, а) при прочих равных условиях зависит от схемы соединений трансформаторов тока, значения нагрузки z_H , вида к. з. и сочетания поврежденных фаз.

Для схемы полной звезды (рис. 3-18, б) напряжение U_2 при трехфазных и двухфазных к. з. равно падению напряжения в нагрузке фазы, т. е.

$$U_2 = I_2 (r_H + z_p),$$

поэтому

$$z_H^{(3)} = z_H^{(2)} = \frac{U_2^{(2)}}{I_2} = \frac{I_2 (r_H + z_p)}{I_2} = (r_H + z_p).$$

При однофазном к. з. U_2 равно падению напряжения в сопротивлении петли проводов «фаза» — «нуль» ($2r_H$) и в сопротивлении реле в фазе $z_{p\phi}$ и нулевом проводе z_{p0} ; отсюда

$$z_H^{(1)} = \frac{I_2 (2r_H + z_{p\phi} + z_{p0})}{I_2} = 2r_H + z_{p\phi} + z_{p0}.$$

Таким образом, наибольшее сопротивление нагрузки z_H получается при однофазном к. з.

В схеме неполной звезды (рис. 3-18, в) максимальная нагрузка на трансформаторах тока имеет место при двухфазных к. з. между фазой, имеющей трансформатор тока, и фазой, не имеющей его, и равна $z_H = 2r_H + z_p$.

В схеме включения реле на разность токов двух фаз (рис. 3-18, д) наибольшая нагрузка получается при двухфазных к. з. между фазами, имеющими трансформаторы тока. В этом случае ток в реле $I_p = 2I_2$, а

$$z_H = \frac{2I_2 r_H + 2I_2 z_p + 2I_2 r_H}{I_2} = 4r_H + 2z_p.$$

В схеме треугольника (рис. 3-18, е) трансформаторы имеют наибольшую нагрузку как при трехфазном, так и при двухфазном к. з. В обоих случаях

$$z_H = 3(r_H + z_p).$$

Погрешность трансформаторов тока должна определяться при максимальном значении z_H для данной схемы.

Рис. 3-19. Нагрузка трансформаторов тока, замкнутых на сопротивление.

а — при одном трансформаторе тока; б — при двух трансформаторах с последовательным соединением обмоток.

Для уменьшения нагрузки на трансформаторы тока при их недостаточной мощности можно применять последовательное включение двух трансформаторов тока, $ТТ1$, $ТТ2$, установленных на одной фазе (рис. 3-19) с одинаковым коэффициентом n_T . В этом случае падение напряжения в нагрузке делится поровну между вторичными обмотками трансформаторов. Токи в обоих трансформаторах тока одинаковы и равны $I_2 = I_1/n_T$. Поэтому нагрузка каждого трансформатора составляет половину общей нагрузки z_H .

3.9. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКОВ

а) Общие сведения

Наряду с защитами, реагирующими на полный ток фазы, применяются устройства релейной защиты, реагирующие на симметричные составляющие прямой I_1 , обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей.

Для осуществления таких устройств необходимы фильтры, выделяющие симметричные составляющие из токов трехфазной сети [Л. 23, 98].

Фильтры токов симметричных составляющих представляют собой (рис. 3-20, а) специальные схемы, на выходе которых (зажимы m и n) получается ток I_Φ , пропорциональный соответствующей симметричной составляющей токов трехфазной сети, питающих фильтр Φ . К выходным зажимам фильтра подключается реле P , реагирующее на полученную составляющую.

В зависимости от используемых элементов фильтры делятся на активно-индуктивные, активно-емкостные, трансформаторные.

Имеются фильтры простые, выделяющие только одну последовательность (прямую, обратную или нулевую), и комбинированные, ток на выходе которых пропорционален двум или всем трем симметричным составляющим токов сети. В общем случае ток на выходе комбинированного фильтра

$$I_\Phi = k_1 I_1 + k_2 I_2 + k_3 I_0, \quad (3-16)$$

где k_1 , k_2 и k_3 — постоянные коэффициенты фильтра.

В этом параграфе рассматриваются фильтры токов обратной и прямой последовательностей. Комбинированные фильтры и фильтры нулевой последовательности разбираются при описании защит, в которых они используются.

б) Фильтры токов обратной последовательности

Допустим, что фильтр Φ на рис. 3-20, а — есть фильтр обратной последовательности, тогда ток $I_\Phi = kI_2$.

Токи прямой и нулевой последовательностей через такой фильтр не проходят. Это означает, что при подводе токов I_1 и I_0 к фильтру I_2 его выходной ток $I_\Phi = 0$.

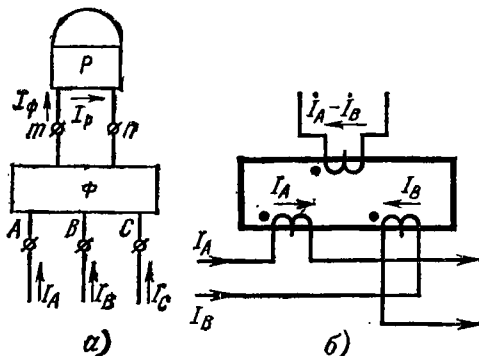


Рис. 3-20. Фильтр токов обратной последовательности (а); включение на разность токов двух фаз $I_A - I_B$ (б).

Питание фильтра тока обратной последовательности может производиться фазными токами $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ (рис. 3-20, а) или разностью фазных токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B, \dot{I}_B - \dot{I}_C, \dot{I}_C - \dot{I}_A$ (рис. 3-20, б). Разность токов двух фаз не содержит составляющей нулевой последовательности $\dot{I}_0$, так как при вычитании одного фазного тока из другого, например $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, нулевые составляющие взаимно компенсируются. Поэтому при питании фильтра I_2 разностью фазных токов фильтр должен запитывать только токи прямой последовательности, что несколько упрощает его выполнение.

Рассмотрим в качестве примера трансформаторный фильтр тока обратной последовательности, показанный на рис. 3-21, а. По этой схеме Чебоксарским электроаппаратным

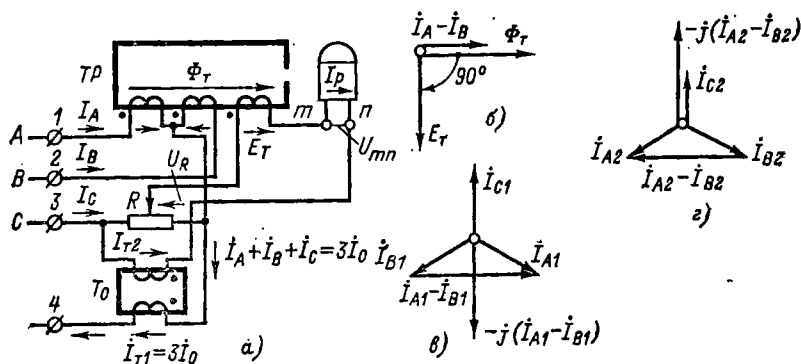


Рис. 3-21. Активно-индуктивный (трансформаторный) фильтр тока I_2 типа РТ-2.

заводом выполняется фильтр типа РТ-2. Фильтр состоит из трехобмоточного трансреактора TP (трансформатора с воздушным зазором, см. § 2-16), активного сопротивления R и двухобмоточного вспомогательного трансформатора T_0 .

Трансреактор TP имеет две первичные и одну вторичную обмотки. Первичные обмотки включены на ток сети фаз A и B разноименной полярностью. Поэтому создаваемый ими магнитный поток пропорционален разности токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B$.

Этот поток индуцирует во вторичной обмотке TP э. д. с., отстающую от индуцирующих ее потока Φ_T и тока $\dot{I}_A - \dot{I}_B$ на 90° (рис. 3-21, б). В комплексной форме $\dot{E}_T = -j\omega M (\dot{I}_A - \dot{I}_B)$, где ωM представляет собой реактивное сопротивление x_T , обусловленное взаимной индукцией обмоток трансреактора. Отсюда

$$\dot{E}_T = -jx_T (\dot{I}_A - \dot{I}_B). \quad (3-17)$$

Наличие воздушного зазора в магнитопроводе трансреактора обеспечивает линейную зависимость величины э. д. с. от тока $\dot{I}_A - \dot{I}_B$. Величина x_T подбирается равной $R/\sqrt{3}$. Из дальней-

шего будет видно, что последнее является необходимым условием для исключения влияния токов прямой последовательности на выходное напряжение фильтра.

По активному сопротивлению R проходит ток I_C . В результате этого на зажимах сопротивления возникает напряжение

$$\dot{U}_R = \dot{I}_C R. \quad (3-18)$$

Выходной контур фильтра mn образуется вторичной обмоткой трансреактора и сопротивлением R . Напряжение на разомкнутых зажимах mn равно сумме э. д. с. и напряжений, действующих в контуре, т. е. $\dot{U}_{mn} = \dot{U}_R + \dot{E}_T$. За положительное направление в выходном контуре принято направление, противоположное токам на входе фильтра. Выразив $\dot{U}_R$ и $\dot{E}_T$ через токи с помощью выражений (3-17) и (3-18), получим:

$$\dot{U}_{mn} = \dot{I}_C R - j(\dot{I}_A - \dot{I}_B) x_T. \quad (3-19)$$

Чтобы установить влияние каждой последовательности на величину U_{mn} , определим его значение, пользуясь выражением (3-19) при поочередном питании фильтра токами нулевой, прямой и обратной последовательностей.

Токи нулевой последовательности ($I_{0A} = I_{0B} = I_{0C}$). В фазах A и B I_{0A} и I_{0B} взаимно уничтожаются благодаря принятой схеме включения трансреактора и разность токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B$. Ток $\dot{I}_{0C}$, проходящий по R , компенсируется с помощью трансформатора T_0 . Первичная обмотка трансформатора T_0 включена в нулевой провод звезды на ток $3\dot{I}_0$. Коэффициент трансформации трансформатора T_0 принят равным $1/3$, поэтому вторичный ток $\dot{I}_{T2} = \frac{1}{3} \dot{I}_{T1} = \dot{I}_0$, поскольку $I_{T1} = 3I_0$. Как видно из рис. 3-21, a , ток I_{T2} направлен навстречу току I_C , в результате чего I_{0C} компенсируется током I_{T2} .

Следовательно, токи нулевой последовательности при принятой схеме фильтра взаимно компенсируются и не создают напряжения на выходе фильтра.

Токи прямой последовательности $\dot{I}_{A1}$, $\dot{I}_{B1}$, $\dot{I}_{C1}$, проходя по фильтру, создают напряжения $\dot{E}_T$ и $\dot{U}_R$, образующие U_{mn} на выходе фильтра по выражению (3-19). Найдем с помощью векторной диаграммы на рис. 3-21, b величину и фазу вектора $-j(\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1})$, входящего в (3-19). Для этого построим вектор $\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1}$ и, умножив его на $-j$ (означающее поворот умножаемого вектора на 90° по часовой стрелке), получим, что $-j(\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{B1}) = \sqrt{3}\dot{I}_{C1}$.

Подставив полученное значение в (3-19), найдем:

$$\dot{U}_{mn(1)} = \dot{I}_C R - \sqrt{3}\dot{I}_C \frac{R}{\sqrt{3}} = 0.$$

Это означает, что токи прямой последовательности не создают напряжения на выходе фильтра, т. е. они не проходят через фильтр. Такой результат достигнут поворотом $(I_A - I_B)$ на 90° и выполнением условия $x_T = R/\sqrt{3}$, что позволило получить $\dot{E}_T = -\dot{U}_R$.

Токи обратной последовательности $(\dot{I}_{A2}, \dot{I}_{B2}, \dot{I}_{C2})$. Из диаграммы на рис. 3-21, *г* следует, что вектор $-j(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2})$ совпадает по фазе с вектором $\dot{I}_{C2}$ и больше его в $\sqrt{3}$ раз. С учетом этого $\dot{E}_T = -jx(\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{B2}) = \sqrt{3}\dot{I}_{C2}\frac{R}{\sqrt{3}} = \dot{I}_{C2}R$.

Напряжение $\dot{U}_R = \dot{I}_{C2}R$ совпадает по фазе с $\dot{E}_T$ и с ним суммируется.

Подставляя полученное значение в (3-19), находим:

$$\dot{U}_{mn(2)} = \dot{I}_{C2}R + \sqrt{3}\dot{I}_{C2}\frac{R}{\sqrt{3}} = 2\dot{I}_{C2}R.$$

Поскольку токи прямой и нулевой последовательностей не создают напряжения на выходе фильтра, результирующее напряжение

$$\dot{U}_{mn} = U_{mn(2)} = 2\dot{I}_{C2}R, \quad (3-20)$$

где $\dot{I}_{C2}$ — составляющая обратной последовательности тока, питающего фильтр.

Таким образом, рассмотренная схема является фильтром токов обратной последовательности.

Аналогичным образом выполняются все разновидности фильтров I_2 .

Если к выходным зажимам фильтра mn подключить реле, то в его обмотке будет проходить ток [Л. 23]

$$I_p = \frac{U_{mn}}{z_\phi + z_p}.$$

Для рассмотренного фильтра с учетом (3-20)

$$I_p = \frac{2I_{C2}R}{z_\phi + z_p} \equiv I_{C2}, \quad (3-21)$$

где z_ϕ — сопротивление фильтра, измеренное со стороны выходных зажимов mn при разомкнутой цепи на входе фильтра; z_p — сопротивление реле.

Реле, питающиеся через фильтр обратной последовательности (фильтр-реле), действуют только при несимметричных к. з., когда токи к. з. содержат составляющую обратной последовательности и не реагируют на симметричную нагрузку и трехфазные к. з., поскольку в этих случаях $I_2 = 0$.

Т о к н е б а л а н с а. За счет неточного подбора сопротивлений фильтра может появиться ток небаланса $I_{нб}$ при отсутствии

тока I_2 , который ограничивает чувствительность фильтр-реле. Поэтому $I_{\text{нб}}$ должен сводиться к минимальному значению регулировкой сопротивлений. *Баланс сопротивлений может нарушиться при изменении частоты в сети*, питающей фильтр, из-за того, что реактивные сопротивления x_L , x_C зависят от частоты. Это свойство фильтров является их недостатком.

Чувствительность фильтра-реле зависит от чувствительности реле и мощности, отдаваемой фильтром. Каждый источник питания отдает наибольшую мощность приемнику в случае равенства по величине их полных сопротивлений, т. е. при $z_p = z_{\text{ф}}$. Абсолютный максимум отдаваемой мощности имеет место, если при равенстве полных сопротивлений источника и приемника их реактивные сопротивления также равны, но имеют противоположные знаки [Л. 23]. Следовательно, для обеспечения максимальной отдачи мощности фильтром необходимо выполнить условие

$$r_p = r_{\text{ф}} \text{ и } x_p = -x_{\text{ф}}. \quad (3-22)$$

В качестве реле, питающихся от фильтра, обычно применяются чувствительные электромагнитные токовые реле или поляризованные реле постоянного тока, которые подключаются к фильтру через выпрямитель.

в) Фильтры токов прямой последовательности

Учитывая, что токи прямой последовательности отличаются от обратной только чередованием фаз, любой фильтр обратной последовательности можно превратить в фильтр прямой последовательности, изменив на его зажимах последовательность подводимых фаз.

Например, если на фильтре, изображенном на рис. 3-21, а, поменять местами фазы B и C , т. е. подключить фазу C к зажиму 2, а фазу B — к зажиму 3, то на выходных зажимах фильтра появится напряжение $U_{\text{тн}}$, пропорциональное токам прямой последовательности, а токи обратной последовательности не будут давать напряжения на выходе фильтра.

Фильтры токов прямой последовательности в чистом виде используются редко и применяются как правило, в комбинации с другими составляющими ($\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$, $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$).

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

4-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Одним из признаков возникновения к. з. является увеличение тока в линии. Этот признак используется для выполнения защит, называемых токовыми. Токковые защиты приходят в действие при увеличении тока в фазах линии сверх определенного значения. В качестве реле, реагирующих на возрастание тока, служат максимальные токовые реле (см. гл. 2).

Токковые защиты подразделяются на максимальные токовые защиты и токовые отсечки. Главное

различие между этими защитами заключается в способе обеспечения селективности.

Селективность действия максимальных защит достигается с помощью выдержки времени. Селективность действия токовых отсеков обеспечивается соответствующим выбором тока срабатывания.

4-2. ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ПОМОЩЬЮ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Максимальные токовые защиты являются основным видом защит для сетей с односторонним питанием. В сетях более сложной конфигурации максимальная защита применяется как вспомогательная в отдельных случаях.

В сетях с односторонним питанием максимальная защита должна устанавливаться в начале каждой линии со стороны источника питания (рис. 4-1, а). При таком расположении защит

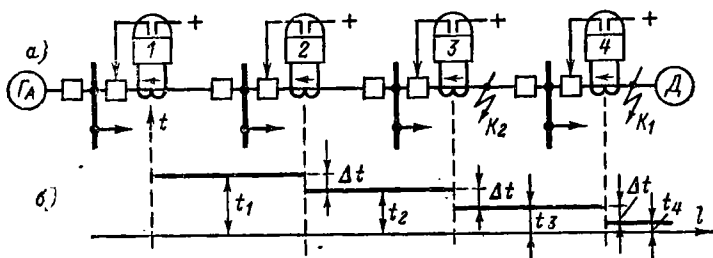


Рис. 4-1. Максимальные токовые защиты в радиальной сети с односторонним питанием.

а — размещение защит; б — выдержки времени защит, выбранные по ступенчатому принципу.

каждая линия имеет самостоятельную защиту, отключающую линию в случае повреждения на ней самой или на шинах питающейся от нее подстанции.

При к. з. в какой-либо точке сети, например в точке K_1 (рис. 4-1, а), ток к. з. проходит по всем участкам сети, расположенным между источником питания и местом повреждения, в результате чего приходят в действие все защиты (1, 2, 3, 4). Однако по условию селективности сработать на отключение должна только защита 4, установленная на поврежденной линии.

Для обеспечения указанной селективности максимальные защиты выполняются с выдержками времени, нарастающими от потребителей к источнику питания, как это показано на рис. 4-1, б. При соблюдении этого принципа в случае к. з. в точке K_1 раньше других сработает защита 4 и произведет отключение поврежденной линии. Защиты 1, 2 и 3 вернутся в начальное положение, не успев подействовать на отключение. Соответственно при к. з. в точке K_2 быстрее всех сработает защита 3, а защиты 1 и 2, имеющие большее время, не действуют.

Рассмотренный принцип подбора выдержек времени называется **ступенчатым**.

В сетях с двусторонним питанием достигнуть селективного действия максимальной защиты только путем подбора выдержек времени, как правило, не удастся; в этих сетях вместо максимальной токовой защиты применяют более сложные направленные защиты.

4.3. СХЕМЫ ЗАЩИТЫ

а) Разновидности схем максимальной защиты

Максимальные защиты выполняются трехфазными и двухфазными (§ 3-6, б, в, д), прямого и косвенного действия (§ 1-8).

По способу питания оперативных цепей максимальные защиты косвенного действия делятся на защиты с **постоянным** и **переменным** оперативным током.

По характеру зависимости времени действия реле от тока максимальные защиты подразделяются на защиты с **независимой** и **зависимой** характеристиками.

Максимальные защиты прямого действия и на переменном оперативном токе имеют существенные отличия в выполнении оперативных цепей, применяемой аппаратуре и в расчете параметров, поэтому они рассматриваются отдельно (см. § 4-8).

б) Схемы трехфазной защиты на постоянном оперативном токе

Защита с независимой выдержкой времени (рис. 4-2). В трехфазных защитах трансформаторы тока и обмотки токовых реле соединяются по схеме полной звезды, рассмотренной в § 3-6, б.

Основными элементами схемы максимальной защиты (рис. 4-2) являются: токовые реле 1, срабатывающие при появлении тока к. з. и выполняющие функции пускового органа защиты, и реле времени 2, создающее выдержку времени и выполняющее функции органа времени. Кроме основных, в схеме имеются и вспомогательные реле; к ним относятся промежуточное реле 3 и указательное реле 4.

При возникновении к. з. срабатывают токовые реле тех фаз, по которым проходит ток к. з. Контакты всех токовых реле со-

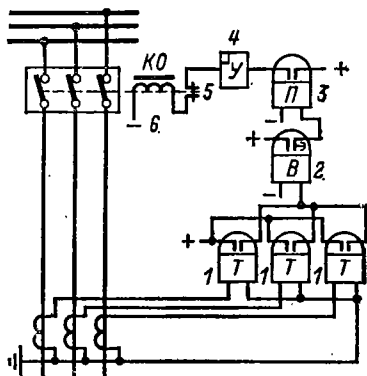


Рис. 4-2. Трехлинейная схема трехфазной максимальной токовой защиты с независимой выдержкой времени.

единены параллельно, поэтому при срабатывании любого токового реле замыкается цепь обмотки реле времени 2. Через заданный интервал времени контакты реле времени замыкаются и приводят в действие промежуточное реле 3. Последнее срабатывает мгновенно и подает ток в катушку отключения выключателя 6 через блокировочный контакт 5 (см. § 1-8).

Промежуточное реле 3 устанавливается в тех случаях, когда реле времени не может замыкать цепь катушки отключения из-за недостаточной мощности своих контактов.

Указательное реле 4 включается последовательно с катушкой отключения. При появлении тока в этой цепи указательное реле срабатывает, его флажок выпадает, фиксируя таким образом действие максимальной защиты и появление тока в катушке отключения.

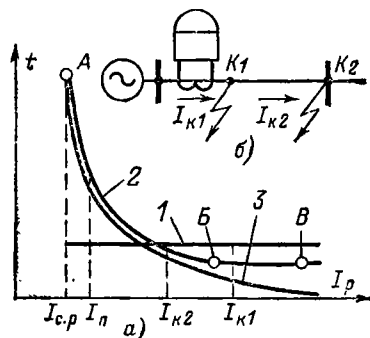


Рис. 4-3. Характеристики зависимости выдержки времени от тока в реле максимальных токовых защит (а) и схема сети, поясняющая работу защиты (б).

1 — независимая; 2 — зависимая; 3 — ограниченно зависимая; АБ — зависимая и ВВ — независимая части характеристики.

держкой времени и имеет характеристику в виде прямой 1 на рис. 4-3.

Защита с зависимой характеристикой. Наряду с независимой защитой применяется максимальная защита с зависимой и ограниченно зависимой характеристиками $t = f(I)$ (кривые 2 и 3 на рис. 4-3). Оба вида зависимых защит выполняются при помощи токовых реле, работающих не мгновенно, а с выдержкой времени, зависящей от величины тока. Примером такого реле является реле типа РТ-80 (см. § 2-8). Схема зависимой защиты с реле типа РТ-80, РТ-90 изображена на рис. 4-4. В этой схеме отсутствует реле времени, а также промежуточное и указательное реле, так как реле типа РТ-80, РТ-90 имеет контакты достаточной мощности и сигнальный флажок, выпадающий при срабатывании реле.

В отличие от защиты с независимой характеристикой (прямая 1 на рис. 4-3, а) защита с зависимой характеристикой (кри-

Блокировочный контакт привода выключателя 5 служит для разрыва тока катушки отключения, так как контакты промежуточных реле не рассчитываются на размыкание этой цепи. Блокировочный контакт должен размыкаться раньше, чем произойдет возврат промежуточного реле.

Время действия рассмотренной защиты определяется выдержкой времени, установленной на реле времени, и не зависит от величины тока к. з., поэтому такая защита называется защитой с независимой вы-

• вые 2 и 3) действует при токах $I_p = (1 \div 2) I_{с.з}$ со значительно большей выдержкой времени, чем при к. з., что улучшает отстройку защиты от кратковременных перегрузок (I_n). Кроме того, защиты с зависимой характеристикой позволяют ускорить отключение при повреждении в начале линии (точка K_1 на рис. 4-3, б), если ток при к. з. в K_1 значительно больше, чем при к. з. в конце линии в точке K_2 . Однако согласование выдержек времени независимых защит значительно проще (см. § 4-5), поэтому зависимые защиты следует применять только в случаях явного преимущества.

Трехфазные схемы максимальной защиты, приведенные на рис. 4-2 и 4-4, реагируют на все виды к. з., включая и однофазные, и поэтому их применяют в сети с глухо заземленной нейтралью, где возможны как междуфазные, так и однофазные к. з.

В сети с изолированной нейтралью трехфазные схемы не рекомендуются к применению по следующим причинам:

1. Трехфазные схемы дороже двухфазных (§ 4-3, в), так как для их выполнения требуется больше оборудования и соединительных проводов.

2. Трехфазные защиты в большем числе случаев, чем двухфазные, работают неселективно при двойных замыканиях на землю, как это показано в § 4-4.

в) Схемы двухфазной защиты на постоянном оперативном токе

В тех случаях, когда максимальная защита должна действовать только при междуфазных к. з., применяются двухфазные схемы с двумя или одним реле.

Двухрелейная схема с независимой характеристикой (рис. 4-5, а). Токовые цепи защиты выполняются по схеме неполной звезды (см. § 3-6, в). Элементы схемы и их назначение такие же, как в трехфазной схеме на рис. 4-2.

Достоинством двухрелейной схемы является то, что она:

- 1) реагирует (так же как и трехфазная) на все междуфазные к. з. на линиях;

- 2) при замыканиях на землю в двух разных точках сети с изолированной нейтралью работает селективно в большем числе случаев, чем трехфазная схема (см. § 4-4);

- 3) экономичнее трехфазной схемы, так как для ее выполнения требуется меньше оборудования и проводов.

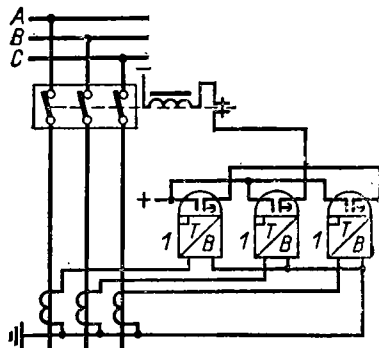


Рис. 4-4. Трехлинейная схема трехфазной максимальной токовой защиты с зависимой от тока выдержкой времени.

К недостаткам двухфазной схемы нужно отнести ее меньшую чувствительность (по сравнению с трехфазной схемой) при двухфазных к. з. за трансформатором с соединением обмоток λ/Δ . Как видно из рис. 3-17, а, при двухфазном к. з. на стороне Δ ток в одной фазе звезды равен $\frac{2}{\sqrt{3}} I_K$, а в двух других $-\frac{1}{\sqrt{3}} I_K$, т. е. в 2 раза меньше.

То же самое получается и при соединении обмоток трансформатора Δ/λ в случае двухфазного к. з. на стороне звезды.

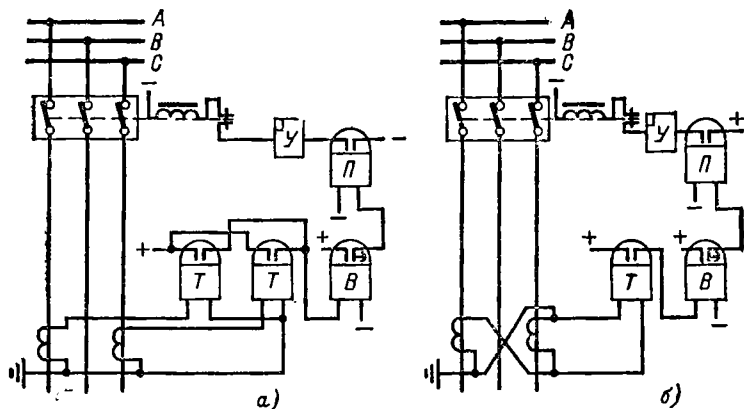


Рис. 4-5. Двухфазные схемы максимальной токовой защиты.

а — двухрелейная; б — однорелейная.

При трехфазной схеме одно из реле защиты питается большим током к. з. $\frac{2}{\sqrt{3}} I_K$, в то время как при двухфазной схеме в одном из трех возможных случаев двухфазного к. з. (AB, BC, CA) трансформаторы тока защиты оказываются на фазах с меньшими токами к. з. $\left(\frac{1}{\sqrt{3}} I_K\right)$. Поэтому двухфазная защита при двухфазных к. з. за трансформаторами с соединением обмоток λ/Δ и Δ/λ имеет в 2 раза меньшую чувствительность, чем трехфазная защита.

При необходимости чувствительность двухфазной схемы можно повысить, установив третье токовое реле в общем проводе токовых цепей. В этом проводе (см. § 3-6, в) протекает геометрическая сумма токов двух фаз, питающих схему (A и C на рис. 4-5, а), равна току третьей (отсутствующей в схеме) фазы B, т. е. $\dot{I}_{0.л} = -(\dot{I}_a + \dot{I}_c) = \dot{I}_b$.

Таким образом, с дополнительным реле двухфазная схема становится равноценной по чувствительности с трехфазной.

Вследствие отмеченных выше положительных свойств двухфазные схемы широко применяются в сетях с изолированной нейтралью, где возможны только междуфазные к. з. Двухфазные схемы применяются в качестве защиты от междуфазных к. з. и в сетях с глухозаземленной нейтралью, при этом для отключения однофазных к. з. устанавливается дополнительная защита, реагирующая на ток нулевой последовательности.

Однорелейная схема (рис. 4-5, б). Защита состоит из тех же элементов, что и предыдущая схема. Токовое пусковое реле T одно, оно включается на разность токов двух фаз $\dot{I}_p = \dot{I}_A - \dot{I}_B$ и реагирует на все случаи междуфазных к. з. (полной и неполной звезды), как было показано в § 3-6.

Преимуществом схемы является наименьшее число токовых реле и соединительных проводов, необходимых для ее выполнения (одно реле и два токовых провода).

К недостаткам, ограничивающим применение схемы, нужно отнести:

1) меньшую чувствительность по сравнению с двухрелейной схемой при к. з. между фазами AB и BC (§ 3-6, д). Этот недостаток имеет значение при малой кратности токов к. з., когда I_n близко к току нагрузки;

2) недействие защиты при одном из трех возможных случаев к. з. за трансформатором с соединением обмоток Δ/Δ (см. § 3-6), когда $\dot{I}_p = \dot{I}_a - \dot{I}_c = 0$;

3) при неисправности единственного токового реле или проводов, связывающих его с трансформаторами тока, защита откажет в действии при к. з. Двухрелейная схема (рис. 4-5, а) не имеет такого недостатка, так как при трехфазных к. з. и двухфазных между A и C в этой схеме работают два реле и поэтому обрыв одного провода не приведет к отказу защиты.

Первый недостаток не позволяет применять однорелейные схемы в сети с малой кратностью токов к. з. Второй исключает применение схемы в сетях, где имеются трансформаторы с соединением обмоток Δ/Δ , если при к. з. за ними рассматриваемая защита должна действовать. Третий ограничивает применение однорелейной защиты в сетях, где отказ защиты может отразиться на электроснабжении большого участка сети.

Однорелейная схема находит применение в распределительных сетях 6—10 кВ и для защиты электродвигателей. В сетях 35 кВ и выше из-за указанных недостатков однорелейная схема почти не применяется.

Двухфазная защита с зависимой характеристикой. Токовые цепи этой защиты выполняются так же, как и у защиты с независимой характеристикой. Токовое реле имеет зависимую характеристику, в качестве него используется реле типа РТ-80 и РТ-90.

Схемы защит аналогичны схемам на рис. 4-5, а и б, за исключением того, что в них отсутствуют реле времени и ука-

зательное реле. Все сказанное о двухфазных схемах с независимой характеристикой относится и к схемам с зависимой характеристикой.

4-4. ПОВЕДЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ДВОЙНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

В сети с изолированной нейтралью возможны одновременные замыкания на землю разноименных фаз в двух точках сети (рис. 4-6). В этих случаях желательно отключать не обе поврежденные линии, а только одну из них $Л1$ или $Л2$. При таком отключении к. з. ликвидируется с наименьшим ущербом для потребителей (селективно), а оставшееся однофазное замыкание (K_2

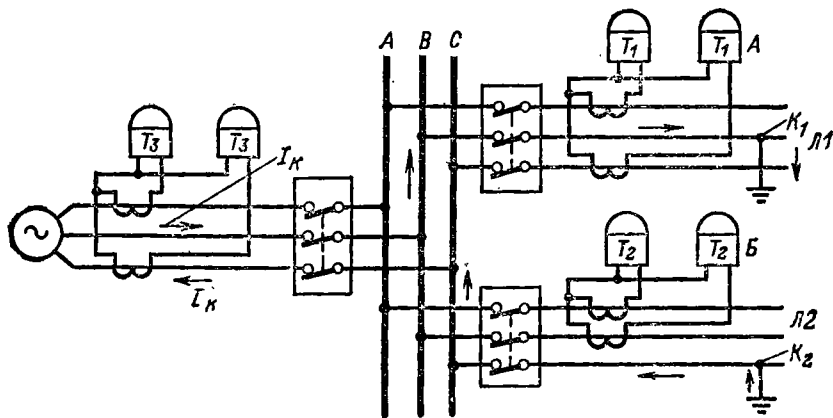


Рис. 4-6. Неправильная расстановка трансформаторов тока двухфазных максимальных защит в сети с изолированной нейтралью.

или K_1) отключается вручную после перевода питания потребителей поврежденной линии на другой источник питания.

Селективная ликвидация двойных замыканий на землю является сложной задачей.

С помощью токовой защиты ее можно решить, хотя и не полностью, применяя двухфазную схему максимальной защиты при условии, что трансформаторы тока на всех элементах сети данного напряжения устанавливаются на одноименных фазах.

При случайном расположении трансформаторов тока (на разных участках, на разноименных фазах) защита может работать неправильно, если оба замыкания на землю возникнут на тех фазах, где трансформаторов тока нет, как это показано на рис. 4-6.

В этом случае защиты обеих поврежденных линий не подействуют, что повлечет неселективное отключение источника питания сети.

Если же трансформаторы тока защиты установлены везде на одноименных фазах (например, *A* и *C*), то возможность такого неселективного отключения исключается.

Из рассмотрения рис. 4-7 нетрудно установить, что при размещении трансформаторов тока на одноименных фазах *A* и *C* повреждения будут отключаться селективно (т. е. в одной точке сети), за исключением следующих двух случаев:

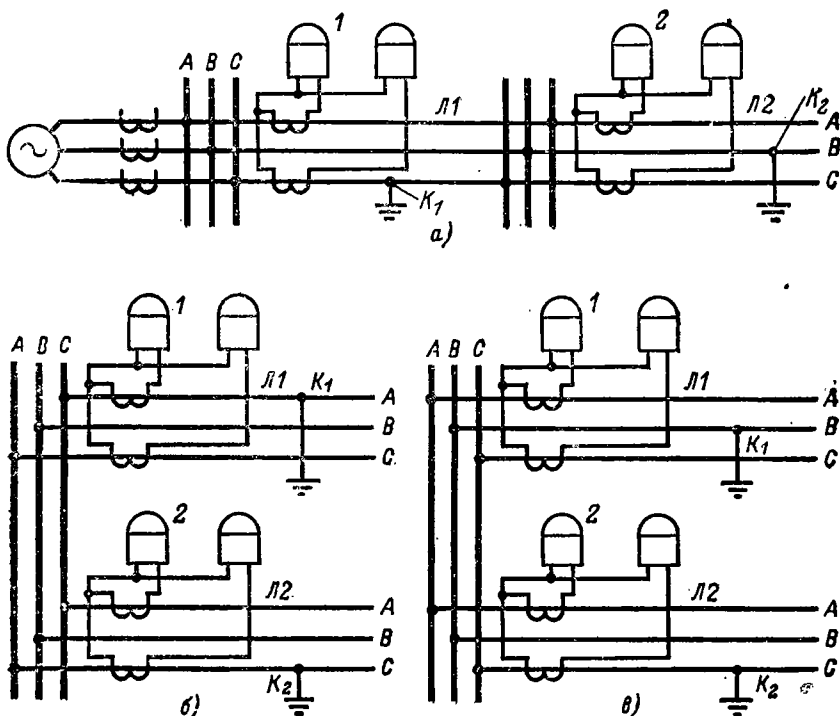


Рис. 4-7. Различные случаи работы двухфазной максимальной токовой защиты при замыканиях на землю в двух точках при правильной установке трансформаторов тока (на одноименных фазах).

a — неселективное отключение головного участка; *б* — неселективное отключение одновременно двух линий; *в* — селективное отключение только одной линии.

a) если более удаленное от источника питания замыкание на землю (в точке K_2) окажется на фазе *B*, не имеющей трансформатора тока (рис. 4-7, *a*). В этом случае действует защита 1 и отключит ближайшую к источнику питания линию *L1*, так как защита 2 работать не может. Трехфазная защита в этих условиях обеспечивает селективное отключение линии *L2*;

б) если оба замыкания на землю возникнут на линиях, имеющих защиты с одинаковыми выдержками времени, и на тех фазах (*A* и *C*), которые оборудованы трансформаторами тока (рис. 4-7, *б*). При этом двухфазные защиты обеих линий отключают обе точки

повреждения одновременно, т. е. обе защиты работают неселективно. Совершенно так же в этом случае действует защита и в трехфазном исполнении.

Однако двухфазная защита имеет существенное преимущество перед трехфазной, если одно повреждение (K_1) возникает на фазе, не имеющей трансформатора тока, а второе (K_2) — на фазе, имеющей его (рис. 4-7, в). Двухфазная защита в этом случае работает только на одной из двух поврежденных линий, в результате чего одна из поврежденных линий остается в работе. Трехфазная защита в приведенном случае действует неселективно, отключая обе линии при любом сочетании поврежденных фаз.

Таким образом, в первом из трех приведенных случаев (рис. 4-7, а) имеет преимущество трехфазная схема, а в третьем (рис. 4-7, в) — двухфазная, которая действует правильно в $2/3$ случаев повреждений.

Сопоставляя преимущества и недостатки трехфазной и двухфазной схем, можно считать, что с точки зрения ликвидации двойных замыканий на землю двухфазная схема имеет преимущество перед трехфазной.

4-5. ВЫБОР ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ

Исходным для выбора тока срабатывания максимальной токовой защиты от к. з. является требование, чтобы она надежно работала при повреждениях, но в то же время не действовала при максимальных токах нагрузки и ее кратковременных толчках, вызываемых пуском и самозапуском двигателей, колебанием нагрузки потребителей и другими причинами.

Излишняя чувствительность защиты из-за недостаточной отстройки ее от токов нагрузки может приводить к неправильным отключениям при неопасных перегрузках, что наносит ущерб потребителям. *Слишком чувствительная защита сама становится источником аварий и перебоев в питании потребителей.*

Из этого следует, что *главная задача при выборе тока срабатывания состоит в надежной отстройке защиты от токов нагрузки.* Для этой цели необходимо выполнить два условия:

1) Токовые реле защиты не должны приходить в действие при максимальном рабочем токе нагрузки $I_{н. макс.}$, для чего ток срабатывания защиты¹ $I_{с.з.}$ должен быть больше максимального тока нагрузки:

$$I_{с.з.} > I_{н. макс.} \quad (4-1)$$

2) Токовые реле, сработавшие при к. з. в сети, должны надежно возвращаться в исходное положение после отключения к. з.

¹ Здесь и в дальнейшем под током срабатывания защиты подразумевается наименьший первичный ток в фазе линии, необходимый для действия защиты.

при оставшемся в защищаемой линии рабочем токе. Так, например, при к. з. в токе K сети (рис. 4-8) срабатывают токовые реле защиты 1 и 2. После отключения повреждения защитой 2 прохождение тока к. з. прекращается и пришедшие в действие токовые реле защиты 1 должны возвратиться в начальное положение, так как иначе произойдет неправильное отключение неповрежденной линии. Поэтому ток возврата реле должен быть больше тока нагрузки линии, проходящего через защиту 1 после отключения к. з.

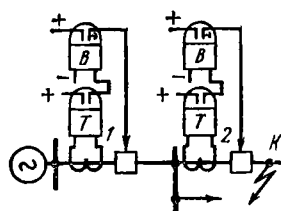


Рис. 4-8. К выбору тока срабатывания максимальной токовой защиты с учетом коэффициента возврата реле.

Этот ток в первый момент времени после отключения к. з. имеет повышенное значение из-за пусковых токов электродвигателей. Асинхронные электродвигатели, составляющие значительную часть нагрузки, во время к. з. тормозятся вследствие возникающего при к. з. понижении напряжения. После отключения к. з. напряжение восстанавливается и все оставшиеся в работе электродвигатели (часть ответственных электродвигателей отключается защитой от понижения напряжения) с а м о з а п у с к а ю т с я, потребляя повышенный пусковой ток (рис. 4-9). Этот ток I_3 постепенно затухает, и в линии устанавливается рабочий ток, который в худшем случае может иметь максимальное значение $I_{н. макс.}$.

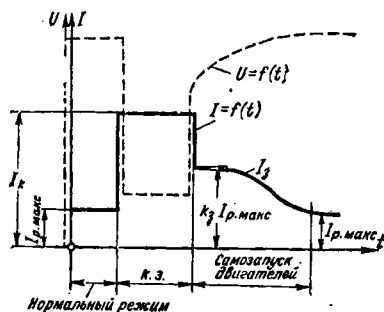


Рис. 4-9. Характер изменения тока и напряжения в линии при к. з. в сети и после его отключения.

— ток I ; — — — — — напряжение U .

исходное принимается условие (4-2). Руководствуясь им, ток возврата выбирают равным:

$$I_{воз} = k_n k_3 I_{н. макс.} \quad (4-3)$$

Коэффициент надежности k_n учитывает возможную погрешность в величине тока возврата реле и принимается равным 1,1—1,2.

Увеличение $I_{н. макс.}$, вызванное самозапуском двигателей, оценивается коэффициентом запуска k_3 . Учет самозапуска двигателей является обязательным. Исходя из этого

$$I_{воз} > k_3 I_{н. макс.} \quad (4-2)$$

При выполнении условия (4-2) выполняется также условие (4-1), так как ток возврата максимальных реле всегда меньше тока срабатывания. Поэтому для отстройки защиты от нагрузки за

Ток срабатывания защиты находится из соотношения, определяющего связь между токами возврата и срабатывания токовых реле: $I_{\text{воз}}/I_{\text{с.з}} = k_{\text{воз}}$. Подставляя в это выражение значение $I_{\text{воз}}$ из (4-3), находим соответствующий ему ток срабатывания:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_{\text{н}}}{k_{\text{воз}}} k_{\text{з}} I_{\text{н. макс.}} \quad (4-4)$$

Вторичный ток срабатывания реле $I_{\text{с.р}}$ находится с учетом коэффициента трансформации трансформаторов тока и схемы включения реле, характеризуемой коэффициентом схемы $k_{\text{сх}}$

$$I_{\text{с.р}} = k_{\text{сх}} \frac{I_{\text{с.з}}}{n_{\text{т}}} \quad (4-5)$$

Для схемы соединения в звезду (полную или неполную) $k_{\text{сх}} = 1$. Для схемы с включением реле на разность токов двух фаз $k_{\text{сх}} = \sqrt{3}$.

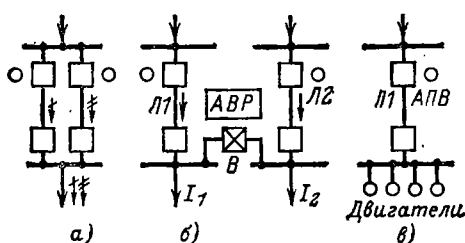


Рис. 4-10. Характерные схемы сети для определения максимального тока нагрузки при выборе тока срабатывания максимальной токовой защиты.

а — при отключении параллельной линии; б — при отключении одной линии и действии АВР; в — при самозапуске электродвигателей.

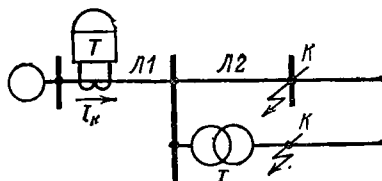


Рис. 4-11. Зона действия максимальной токовой защиты должна охватывать защищаемую линию Л1 и следующий второй участок (линию Л2 и трансформатор Т).

Как видно из выражения (4-4), значение $I_{\text{с.з}}$ зависит от $k_{\text{воз}}$ и $I_{\text{н. макс.}}$. Ток срабатывания обратно пропорционален $k_{\text{воз}}$, поэтому в целях уменьшения $I_{\text{с.з}}$ стремятся применять токовые реле с высоким коэффициентом возврата: примерно 0,85 и выше.

Существенное значение для надежной отстройки защиты от нагрузки имеет правильная оценка величины $I_{\text{н. макс.}}$.

Определяя максимальное значение тока нагрузки, нужно учитывать тяжелое, но в то же время реально возможное увеличение нагрузки, обычно возникающее в результате нарушения нормальной схемы сети. Например, при двух параллельных линиях (рис. 4-10, а) необходимо учитывать, что в случае автоматического отключения одной из них нагрузка на оставшейся линии удвоится. При наличии АВР, включающего выключатель В (рис. 4-10, б), необходимо предусматривать наброс мощности на линию Л1 при отключении Л2 и наоборот. При наличии АПВ

(рис. 4-10, е) необходимо учитывать самозапуск электродвигателей после повторного включения линий от АПВ.

Чувствительность защиты. Ток срабатывания, выбранный по условию отстройки от нагрузки, проверяется по условию чувствительности защиты. Проверка ведется по минимальному значению тока $I_{к.мин}$ при повреждении в конце зоны защиты. Зона действия максимальной токовой защиты должна охватывать защищаемую линию и следующий второй участок, т. е. линию Л2 и трансформаторы, отходящие от шин приемной подстанции (рис. 4-11). Максимальный ток рассчитывается для реального минимального режима на электростанциях и в сетях, питающих линию. Чувствительность защиты оценивается коэффициентом чувствительности:

$$k_a = \frac{I_{к. мин}}{I_{с. з.}}. \quad (4-6)$$

Коэффициент чувствительности для защищаемой линии считается допустимым, если $I_{к.мин}$ в 1,5 раза больше тока срабатывания защиты. Снижение k_a ниже 1,5 не рекомендуется, так как действительный ток в реле при к. з. может оказаться меньше расчетного $I_{к.мин}$ из-за неточности расчета токов к. з., влияния сопротивления в месте повреждения (не учитываемого при расчете) и погрешности трансформаторов тока, уменьшающей вторичный ток. При к. з. на резервируемом участке согласно ПУЭ допускаются $k_a = 1,2$.

4-6. ВЫДЕРЖКА ВРЕМЕНИ ЗАЩИТЫ

а) Степень времени

Для обеспечения селективности выдержки времени максимальных защит выбираются по ступенчатому принципу (рис. 4-12).

Разница между временем действия защит двух смежных участков (например, А и В на рис. 4-12) называется ступенью времени или ступенью селективности:

$$\Delta t = t_A - t_B. \quad (4-7)$$

Величина ступени Δt должна быть такой, чтобы при коротком замыкании на каком-нибудь участке сети (например, на линии В) защита предыдущего участка (т. е. на линии А) не успевала сработать.

Выясним, от чего зависит величина Δt . При к. з. на линии В защита линии А работает в течение времени, пока проходит ток

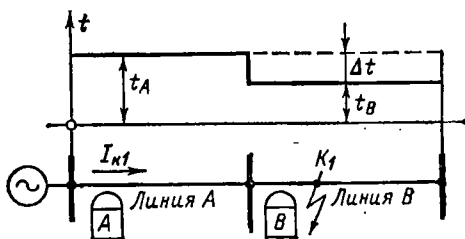


Рис. 4-12. Ступенчатый принцип выбора выдержек времени.

Δt — ступень времени.

к. з. Это время равно:

$$t_3 = t_{3(B)} + t_{п(B)} + t_{в(B)},$$

где $t_{3(B)}$ — выдержка времени защиты B ; $t_{п(B)}$ — погрешность в сторону замедления реле времени защиты B ; $t_{в(B)}$ — время отключения выключателя B с момента подачи импульса в катушку отключения до разрыва тока к. з. контактами выключателя.

Следовательно, чтобы защита линии A не сработала при к. з. на следующем участке, она должна иметь время

$$t_{3(A)} > t_{3(B)} + t_{п(B)} + t_{в(B)}.$$

Приняв некоторый запас $t_{зап}$ и учтя, что защита A может за счет погрешности реле времени снизить свою выдержку времени на величину $t_{п(A)}$, получим:

$$t_{3(A)} = t_{3(B)} + t_{п(B)} + t_{в(B)} + t_{п(A)} + t_{зап}. \quad (4-8)$$

Отсюда минимальная ступень времени

$$\Delta t = t_{3(A)} - t_{3(B)} = t_{п(B)} + t_{в(B)} + t_{п(A)} + t_{зап}. \quad (4-9)$$

Согласно выражению (4-9) выбирается ступень для защит с независимой характеристикой. Что касается защит с зависимой характеристикой, осуществляемых индукционным реле, то они могут продолжать работать по инерции после отключения тока к. з. Поэтому ступень времени у таких защит должна быть увеличена на время инерционной ошибки реле $t_{и}$:

$$\Delta t = t_{п(B)} + t_{п(A)} + t_{в(B)} + t_{зап} + t_{и(A)}. \quad (4-10)$$

Для применяемых в эксплуатации реле и выключателей ступень времени колеблется у защит с независимой выдержкой времени в пределах 0,35 — 0,6 с, а у защит с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой — 0,6 — 1 с.

Так, например, у защит с независимой характеристикой с реле времени типа ЭВ-122 погрешность по времени составляет $t_{п} = \pm 0,12$ с, выключатели МКП-110 имеют время отключения $t_{в} = 0,15$ с. Подставляя указанные значения в выражение (4-9) и принимая запас времени $t_{зап}$ равным 0,1 с, получаем ступень времени

$$\Delta t = 0,12 + 0,15 + 0,12 + 0,1 \approx 0,5 \text{ с.}$$

При согласовании с быстродействующей защитой погрешность ее не учитывается ($t_{п(B)} = 0$), и тогда [на основании (4-9) с учетом указанных значений $t_{п}$ и $t_{в}$] ступень времени $\Delta t = 0,35 \div 0,4$ с.

б) Выбор времени действия защит

Выдержки времени защиты A (рис. 4-12) с независимой характеристикой определяют исходя из заданной ступени времени Δt по уравнению

$$t_{3(A)} = t_{3(B)} + \Delta t. \quad (4-11)$$

Выдержки времени защит с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой также должны удовлетворять условию (4-11), но поскольку время действия этих реле зависит от тока, необходимо задавать пределы тока, при которых это условие должно выполняться. Положим, что линии, показанные на рис. 4-12, оборудованы защитой, имеющей ограниченно зависимую характеристику. Требуется выбрать характеристику защиты линии A (рис. 4-12) и согласовать ее с характеристикой защиты линии B , которая известна.

Защита линии A должна иметь время на ступень больше защиты линий B при всех к. з. в пределах зоны совместного действия защиты A и B , т. е. на линии B . Если при к. з. в точке K_1 (начало зоны защиты B) ток к. з., проходящий через защиты A и B , равен I_{K1} , то при всех к. з. за точкой K_1 , т. е. в зоне работы защиты B , токи к. з. будут меньше. Следовательно, условие селективности (4-11) должно выполняться при токе $I_{K1\max}$ и всех токах, меньших его. В случае к. з. на линии A время действия защиты A не должно согласовываться с защитой B и может быть сколь угодно малым; при этом ток к. з., проходящий через защиту A , будет больше $I_{K1\max}$. Из этих условий вытекает следующее правило подбора зависимых характеристик:

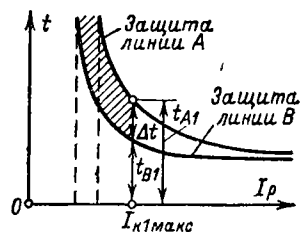


Рис. 4-13. Выбор характеристик зависимых максимальных токовых защит.

1. Строят исходную характеристику $t = f(I)$ защиты B , с которой проводится согласование защиты A , установленной на смежном участке (рис. 4-13).

2. Определяют максимальное значение токов к. з. $I_{K1\max}$, проходящих через защиты A и B при повреждении в начале участка, защищаемого защитой B (в точке K_1).

3. Пользуясь заданной характеристикой защиты B , находят ее выдержку времени t_{B1} при токе $I_{K1\max}$, т. е. при к. з. в начале защищаемой зоны, в точке K_1 (рис. 4-12).

4. По условию селективности выдержка времени защиты A при токе $I_{K1\max}$ должна превышать время защиты B t_{B1} на ступень Δt :

$$t_{A1} \geq t_{B1} + \Delta t. \quad (4-12)$$

Это условие должно выполняться не только при токах $I_{K1\max}$, но и при всех меньших токах к. з.; характеристика защиты A , удовлетворяющая условию (4-12), подбирается при проектировании по типовым характеристикам реле, а в условиях эксплуатации — путем регулирования уставки времени реле.

5. Выбранная характеристика защиты A строится совместно с характеристикой защиты B для наглядной проверки выпол-

нения условия (4-12) при токах к. з., равных и меньших $I_{\text{кзмакс}}$ (рис. 4-13).

Совместное построение характеристик нескольких защит удобно вести относительно первичных фазных токов, но при этом нужно учитывать схему соединения токовых цепей защиты, от которой зависит соотношение между током в реле и током в фазе, т. е. $k_{\text{сх}}$.

Если согласуемые защиты находятся на разных сторонах силового трансформатора, то их характеристики нужно привести к токам одного напряжения.

4-7. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ (БЛОКИРОВКОЙ) ОТ РЕЛЕ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Для повышения чувствительности максимальной токовой защиты при к. з. и улучшения отстройки ее от токов нагрузки применяется пуск или, как часто называют, блокировка при помощи реле минимального напряжения (рис. 4-14).

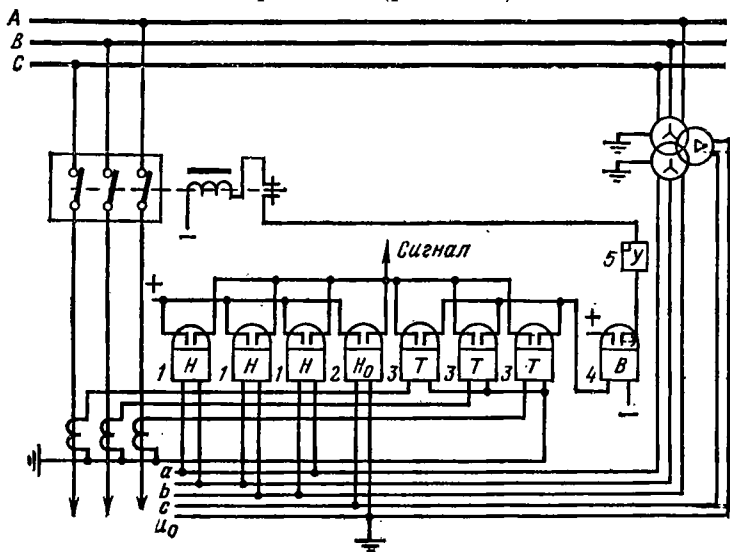


Рис. 4-14. Схема максимальной токовой защиты с блокировкой минимального напряжения.

Из схемы видно, что защита может действовать на отключение только при условии срабатывания реле напряжения 1. Уставки реле напряжения 1 выбираются так, чтобы реле не работали при минимальном уровне рабочего напряжения, не давая возможности защите действовать на отключение, даже если токовые реле 3 замкнут свои контакты в результате перегрузки линии.

При к. з. напряжение сети понижается и реле минимального напряжения 1 срабатывают, разрешая защите действовать на отключение.

В случае обрыва цепи, питающей реле напряжения, последние замыкают свои контакты и защита лишается блокировки. Поэтому в схеме предусмотрена сигнализация состояния контактов реле напряжения I , указывающая на неисправность блокировки.

Для обеспечения надежной работы блокировки при двухфазных к. з. устанавливаются три реле напряжения I , включаемые на линейные напряжения сети (независимо от числа токовых реле). Однако при включении на линейные напряжения реле I плохо реагируют на однофазные к. з. Поэтому в сети с заземленной нейтралью предусматривается дополнительно четвертое блокирующее реле 2 , реагирующее на напряжение U_0 нулевой последовательности, появляющееся при замыканиях на землю.

В сети с изолированной нейтралью токовая часть схемы выполняется двухфазной. В части реле напряжения схема должна выполняться трехфазной для обеспечения надежной работы при двухфазных к. з. Реле H_0 не устанавливается, поскольку защита должна действовать только при междуфазных к. з.

Ток срабатывания токовых реле 3 отстраивается не от максимальной нагрузки линии, а от длительной нормальной нагрузки $I_{н.норм}$, которая на практике может быть в 1,5—2 раза меньше максимальной:

$$I_{с.з} = \frac{k_H}{k_{воз}} I_{н.норм}. \quad (4-13)$$

В результате этого чувствительность защиты при к. з. повышается.

Напряжение срабатывания $U_{с.з}$ реле пуска минимального напряжения выбирается из двух условий:

1) Реле напряжения не должны приходить в действие при минимальном значении рабочего напряжения $U_{раб.мин}$, для этого необходимо иметь

$$U_{с.з} < U_{раб.мин}.$$

2) Реле напряжения, действовавшие при понижении напряжения во время к. з. в сети должны возвратиться (разомкнуть контакты) после отключения к. з. и восстановления напряжения до уровня $U_{раб.мин}$. Для этого напряжение возврата реле $U_{воз}$ должно быть меньше $U_{раб.мин}$

$$U_{воз} < U_{раб.мин}. \quad (4-14)$$

У реле минимального напряжения $U_{с.з} < U_{воз}$, поэтому при выполнении второго условия (условия возврата) выполняется и первое. Исходя из условия возврата (4-14) принимаем $U_{воз}$ на 10—20% меньше $U_{раб.мин}$

$$U_{воз} = \frac{U_{раб.мин}}{k_H}, \quad (4-14a)$$

где k_H — коэффициент надежности, принимается равным $1,1 \div 1,2$.

Учитывая, что $U_{с.з}$ связано с $U_{в0з}$ коэффициентом возврата $k_{в0з} = \frac{U_{в0з}}{U_{с.з}}$, находим напряжение срабатывания:

$$U_{с.з} = \frac{U_{в0з}}{k_{в0з}}.$$

Подставляя $U_{в0з}$ из (4-14а), получаем:

$$U_{с.з} = \frac{U_{\text{раб. мин}}}{k_{н} k_{в0з}}.$$

По этой формуле и ведется расчет $U_{с.з}$. Для реле типа ЭН $k_{в0з} = 1,1 \div 1,5$. При $k_{н} = 1,1$ и $k_{в0з} = 1,15$ $U_{с.з} = 0,78 U_{\text{раб. мин}}$.

Напряжение срабатывания реле, отнесенное ко вторичной стороне трансформатора напряжения,

$$U_{с.р} = \frac{U_{с.з}}{n_{н}} = \frac{U_{\text{раб. мин}}}{k_{н} k_{в0з} n_{н}}, \quad (4-15)$$

где $n_{н}$ — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

Напряжение $U_{\text{раб. мин}}$ обычно принимается на 5—10% ниже нормального уровня.

Чувствительность реле напряжения проверяется по максимальному значению напряжения при к. з. в конце зоны защиты. Коэффициент чувствительности $k_{ч} = U_{с.з} / U_{к. макс}$ считается удовлетворительным, если он равен или превышает 1,5.

Практика показывает, что на длинных линиях, питаемых мощной системой, а также на линиях с реактором чувствительность реле напряжения оказывается недостаточной. Поэтому защита с блокировкой по напряжению применяется на линиях короткой и средней протяженности.

Напряжение срабатывания реле U_0 . Это — реле повышения напряжения. Оно действует при однофазных и двухфазных к. з. на землю, которые сопровождаются появлением напряжения нулевой последовательности U_0 . В нормальном режиме $U_0 = 0$.

Однако за счет погрешности фильтра, питающего реле, на его зажимах имеется некоторое напряжение небаланса $U_{нб}$, от которого реле должно быть отстроено, т. е. $U_{с.р} > U_{нб}$. Исходя из этого условия $U_{с.р}$ обычно принимается равным или большим 15—20% максимального напряжения на зажимах фильтра при однофазных к. з. Величина небаланса легко определяется путем измерения напряжения на зажимах реле в условиях нормальной работы сети.

Максимальная защита с блокировкой минимального напряжения не действует при перегрузках, не сопровождающихся понижением напряжения, и имеет повышенную чувствительность к току к. з. по сравнению с простой максимальной защитой. Она применяется на линиях с большой аварийной нагрузкой, когда простая максимальная защита не обеспечивает достаточной чувствительности и надежной отстройки от перегрузки.

4-8. МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ НА ПЕРЕМЕННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ

а) Требования к трансформаторам тока, питающим оперативные цепи

Источником переменного оперативного тока в схемах максимальных защит по соображениям, изложенным в § 1-9, в, обычно служат трансформаторы тока.

Основным требованием, предъявляемым к трансформаторам тока, питающим оперативные цепи, является условие, чтобы мощность этих трансформаторов тока S_T была достаточна для покрытия мощности, потребляемой оперативной цепью $S_{о.ц.}$, т. е. катушкой отключения выключателя и вспомогательными реле оперативной схемы защиты:

$$S_T \geq S_{о.ц.} \quad (4-16)$$

Величина $S_{о.ц.}$ в зависимости от типа привода выключателя колеблется от 30 до 500—1000 Вт.

Номинальная мощность трансформаторов тока, при которой обеспечивается работа с погрешностью, не превосходящей 10%, относительно мала и при номинальном вторичном токе составляет 15—75 В·А. Из сопоставления приведенных цифр следует, что нагрузка оперативных цепей во многих случаях может оказаться больше номинальной мощности трансформаторов.

В связи с этим возникает необходимость загрузки трансформаторов тока мощностью, превышающей номинальную. Мощность, отдаваемая трансформатором тока, $S_T = I_2 U_2$. С учетом, что $U_2 = I_2 z_H$ и $I_2 = \frac{I_1}{n_T} - \Delta I$:

$$S_T = I_2^2 z_H = \left(\frac{I_1}{n_T} - \Delta I \right)^2 z_H, \quad (4-17)$$

где $\Delta I = I_{нам}$ (см. § 3-1).

Полученная зависимость S_T от z_H при $I_1 = \text{пост.}$ показана на рис. 4-15. Пока z_H мало, трансформатор работает в прямолинейной части характеристики намагничивания (рис. 3-2). Здесь ΔI незначительно и S_T растет почти пропорционально росту z_H . При некотором z_H (оптимальном) S_T достигает максимума. При дальнейшем увеличении z_H трансформатор насыщается, $I_{нам}$ и ΔI растут очень быстро, величина $(I_1 - \Delta I)$ уменьшается и мощность S_T начинает снижаться. Таким образом, каждый трансформатор тока имеет предельную максимальную мощность $S_{макс}$, больше которой его нельзя загрузить. У отечественных трансформаторов тока максимум отдаваемой мощности при номинальном токе достигает 300—1500 В·А. С увеличением нагрузки сверх номинальной ток намагничивания трансформаторов тока и погрешность по току ΔI превосходят 10%. В условиях максимальных значений отдаваемой мощности погрешность ΔI повышается до 30 — 60%.

Чтобы избежать больших погрешностей в цепях, питающих защиту, можно выделять питание оперативных цепей на отдельные трансформаторы тока. Однако такое разделение питания защиты и оперативных цепей для максимальной защиты обычно не требуется, так как правильную работу этой защиты можно обеспечить и при сильно нагруженных трансформаторах тока.

Если погрешность трансформаторов тока превышает 10 %, то тогда подсчет вторичных токов срабатывания защиты и токов к. з., при которых задается время действия зависимых защит, нельзя вести по номинальному коэффициенту трансформации n_T .

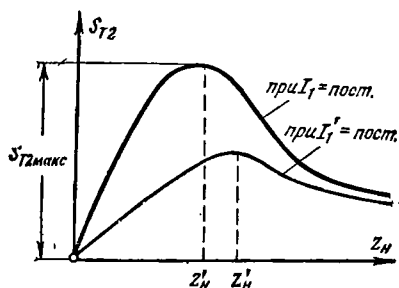


Рис. 4-15. Зависимость мощности S_{T2} , отдаваемой трансформатором тока, от нагрузки Z_N при различных первичных токах I_1 и I_1^* .

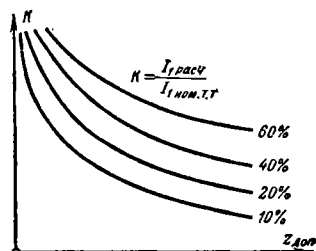


Рис. 4-16. Зависимость $z_{доп}$ от кратности тока K при различных погрешностях f трансформаторов тока.

В этом случае значения вторичных токов находятся с учетом действительной погрешности по выражению

$$I_2 = \frac{I_1}{n_T} - \Delta I. \quad (4-18)$$

Для подобных расчетов используются характеристики, аналогичные 10 %-ным (рис. 3-3), но построенные для 20 — 60 %-ной погрешности (рис. 4-16).

Уменьшение нагрузки на трансформаторы тока можно получить последовательным соединением двух трансформаторов тока или повышением коэффициента трансформации (см. гл. 3).

б) Приставки к приводам выключателей

Рассмотренные возможности работы трансформаторов тока в режиме максимальной отдачи мощности оказываются недостаточными для мощных выключателей 110 — 220 кВ, приводы которых имеют особенно большое потребление. Поэтому для расширения области применения оперативного переменного тока необходимо создание приводов с малым потреблением мощности и несколькими отключающими катушками переменного тока.

В качестве одного из способов, позволяющего уменьшить потребление мощности приводов выключателей и приспособить

имеющиеся приводы к работе на переменном оперативном токе, используются дополнительные устройства к приводам выключателей, получившие название приставок [Л. 25]. Принцип выполнения приставки и ее работы иллюстрируется на рис. 4-17.

В обычном приводе (рис. 4-17, а) боек 1, освобождающий механизм отключения выключателя, приводится в действие сердечником 9 катушки отключения KO , которая должна для этого получать значительную энергию от источника питания. При наличии приставки (рис. 4-17, б) освобождение механизма отключения производится не катушкой отключения, а мощной отключающей пружиной 2.

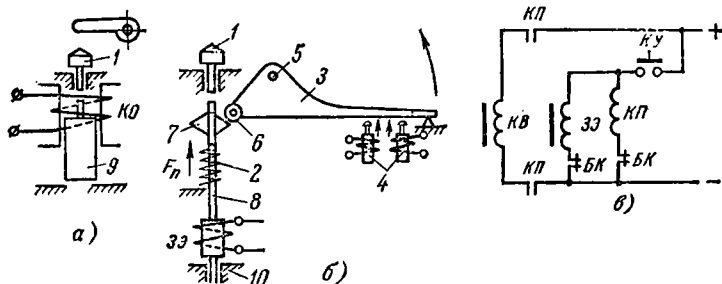


Рис. 4-17. Приставки к электромагнитному приводу выключателя.

а — катушка отключения выключателя; б — приставка к приводу выключателя; в — схема управления приводом с приставкой.

Нормально пружина 2 ската и заперта в таком положении защелкой 3. При подаче тока в один из электромагнитов 4 его сердечник втягивается и ударяет по защелке. Защелка поворачивается вокруг оси 5, ролик 6 скатывается с конуса 7, освобождая пружину 2 и подвижную систему 8. Последняя ударяет по бойку 1, который освобождает механизм отключения.

Возврат подвижной системы 8 в начальное положение осуществляется специальным заводящим электромагнитом 3З, обмотка которого получает ток при включении выключателя от ключа КУ (рис. 4-17, в) и, притягивая подвижную систему 8 к упору 10, сжимает пружину 2 и запирает ее роликом 6 защелки 3. Таким образом, электромагниты приставки 4 выполняют роль катушки отключения привода, но в отличие от последней потребляют 15 — 100 Вт, т. е. значительно меньшую мощность, так как для приведения в действие защелки 3 требуются небольшие усилия по сравнению с усилиями для освобождения отключающегося механизма выключателя.

в) Схемы максимальных защит на переменном оперативном токе [Л. 24, 25, 26, 90]

Схемы максимальных защит с питанием оперативных цепей от переменного тока могут выполняться:

- 1) с питанием от трансформаторов тока — на принципе дешунтирования катушки отключения при срабатывании защиты;
 - 2) с питанием от блоков питания;
 - 3) с питанием от предварительно заряженных конденсаторов.
- Ниже рассматривается каждая из трех схем.

Соображения, изложенные в § 4-3 и 4-4 о свойствах трехфазных и двухфазных схем и области их применения, остаются в силе и для защит на переменном оперативном токе.

г) Схемы с дешунтированием катушки отключения выключателя

Подобные схемы выполняются как с зависимой характеристикой времени действия, так и с независимой.

Схемы защит с зависимой характеристикой в двухфазном исполнении с одним и двумя токовыми реле показаны на рис. 4-18.

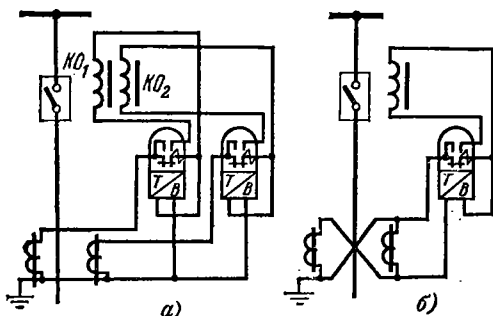


Рис. 4-18. Схема максимальной защиты с дешунтированием катушки отключения выключателя с реле типа РТ-80 или РТ-90.

а — двухрелейная; б — однорелейная.

системы этих реле показан на рис. 4-19. В нормальном режиме, когда реле P не работает, замкнут контакт 1 , через который проходит ток трансформатора тока I_2 , питающий обмотку реле P . Катушка отключения KO разомкнута контактами 2 и 3 . При срабатывании реле контакт 3 перемещается по стрелке и замыкает сначала контакт 2 , а затем размыкает контакт 1 , после чего весь ток I_2 направляется через катушку отключения. Таким образом, замыкание цепи KO происходит без разрыва тока, что облегчает работу контактов и трансформаторов тока.

Схемы с дешунтированием имеют две особенности. Первая состоит в том, что для их выполнения нужны реле, контакты которых обладают необходимой мощностью для переключения проходящего через них тока к. з. примерно 100 — 200 А.

Вторая особенность заключается в том, что трансформаторы тока до момента срабатывания защиты нагружены, как

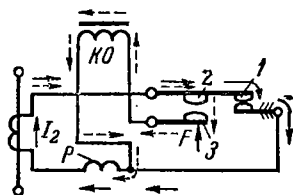


Рис. 4-19. Контактная система реле РТ-85 и РТ-95, предназначенная для дешунтирования катушки отключения без разрыва цепи тока.

— — — путь тока после замыкания контактов 2 и 3 ;
 → — путь тока до замыкания контактов 2 и 3 .

обычно, сопротивлением реле и соединительных проводов, благодаря чему обеспечиваются нормальные условия работы защиты и обычный способ выбора ее уставок.

После срабатывания защиты нагрузка на трансформаторы тока резко возрастает за счет подключения катушки отключения, в результате чего увеличивается погрешность ΔI трансформаторов тока и ток I_2 , проходящий по реле и катушке отключения, уменьшается.

Величина допустимой погрешности ΔI определяется из условия, чтобы ток I_2 был достаточен для удержания в рабочем состоянии реле и надежного действия катушки отключения выключателя.

Схема защиты с независимой характеристикой выдержки времени приведена на рис. 4-20. Пусковые токовые реле мгновенного действия I включены на токи фаз I_a и I_c . Токовое реле времени 2 , промежуточное реле 3 и катушка отключения 4 включены на разность токов двух фаз ($I_a - I_c$). Реле времени имеет маломощные контакты, и поэтому оно действует на промежуточное реле

3 , которое обладает мощными переключающими контактами.

Промежуточное реле производит подключение катушки отключения 4 к трансформаторам тока при действии защиты. Особенностью реле времени и промежуточного реле является то, что они действуют от тока вторичной обмотки трансформаторов тока и включаются в цепь этого тока последовательно. Рассмотрим их устройство.

Токовое реле времени. Основным элементом реле (рис. 4-21) является синхронный микродвигатель с втягиваемым ротором 1 , который питается током трансформаторов тока через вспомогательный насыщающийся трансформатор 2 .

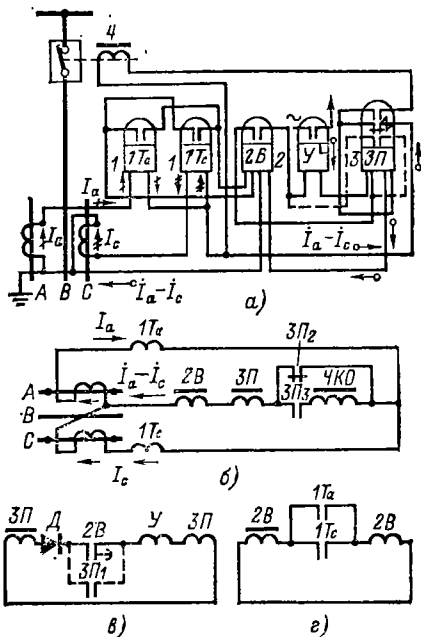


Рис. 4-20. Схема двухфазной защиты с независимой характеристикой на переменном оперативном токе.

а — полная схема; б — токовые цепи и цепь отключения; в — вторичная цепь промежуточного реле П; г — вторичная цепь реле времени В.

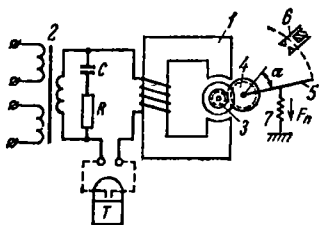


Рис. 4-21. Принцип действия токового реле времени.

Благодаря насыщению трансформатора 2 обеспечивается неизменное напряжение на вторичной обмотке, питающей двигатель 1, при изменении тока в первичной обмотке до 150 А и ограничивается величина вторичного тока, что позволяет замыкать и

размыкать ее цепь контактами обычных токовых реле *T*.

Емкость *C* и сопротивление *R* отфильтровывают гармонические составляющие тока трансформатора 2, ограничивая их поступление в синхронный двигатель.

Нормально вторичная обмотка трансформатора 2 разомкнута, такой режим допустим, поскольку магнитопровод трансформатора 2 насыщается при малых токах. При срабатывании пускового реле *T* защиты (реле 1 на рис. 4-20) оно замыкает вторичную цепь трансформатора 2. В двигателе 1 появляется ток, его ротор втягивается в статор, цилиндрическое зубчатое колесо 3 на оси ротора сцепляется с зубчатой передачей (редуктором) 4, которая передает вращение ротора на рычаг 5, управляющий контактами 6.

Ротор вращается с определенной (постоянной) синхронной скоростью ω , соответствующей частоте 50 Гц. Через время t_p , необходимое для поворота подвижной системы (рычага) 5 на угол α , контакты реле замыкаются: $t_p = \alpha / \omega$. Возврат в исходное положение осуществляется пружиной 7. Выдержка времени регулируется углом α путем перемещения контактов 6. Некоторым недостатком реле является изменение частоты вращения ротора, а следовательно, и выдержки времени реле с изменением частоты,

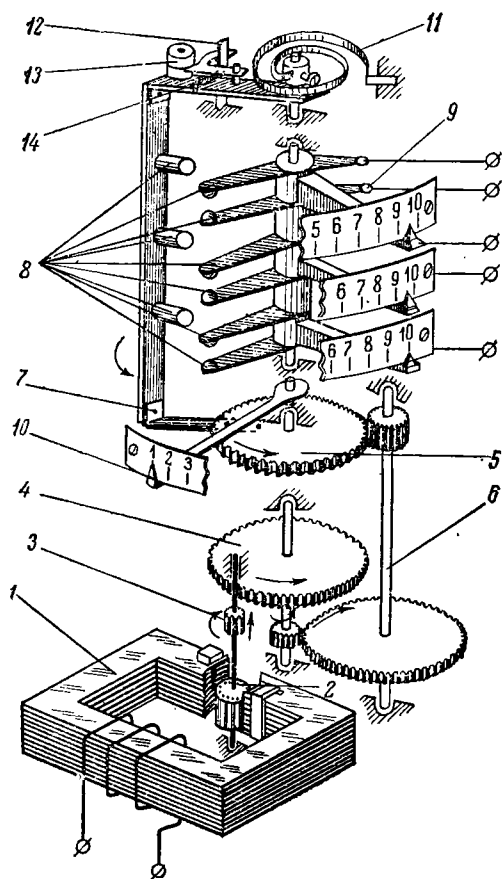


Рис. 4-22. Устройство токового реле времени типа РВМ-12, РВМ-13.

1, 2 — статор и ротор микродвигателя; 3, 4, 5 — зубчатые колеса; 6 — редуктор; 7 — рамка с контактными цилиндрами; 8 — контакты; 9 — поводок установки выдержки времени; 10 — буксирная стрелка; 11 — возвратная пружина; 12 — упор; 13 — замок; 14 — пружина.

контакты реле замыкаются: $t_p = \alpha / \omega$. Возврат в исходное положение осуществляется пружиной 7. Выдержка времени регулируется углом α путем перемещения контактов 6. Некоторым недостатком реле является изменение частоты вращения ротора, а следовательно, и выдержки времени реле с изменением частоты,

При отклонении частоты на 1 Гц время действия меняется на 2%. Эта особенность реле должна учитываться при выборе ступени селективности. Подобные реле типа РВМ-12 на 4 с и РВМ-13 на 9 с выпускаются Чебоксарским электроаппаратным заводом. Их устройство показано на рис. 4-22. Реле имеет два насыщающих трансформатора, что позволяет включать их на ток двух фаз. Реле срабатывает при токе 2,5 — 5 А в зависимости от соединения обмоток и имеет потребление мощности 10 В·А при токе, равном двойному $I_{с.р.}$. Разброс времени действия реле составляет у РВМ-12 0,12 с и у РВМ-13 — 0,25 с.

Токовое промежуточное реле РП-341 (рис. 4-23) состоит из электромагнитного реле клапанного типа 4, питающегося выпрямленным током от выпрямителя 2. Ток к выпрямителю подается от насыщающегося трансформатора 1, первичные обмотки которого включаются последовательно во вторичную цепь трансформаторов тока. Трансформатор 1, как и в предыдущей конструкции, ограничивает величину напряжения и тока, питающих реле 4, что позволяет облегчить условия работы выпрямителя, а также контактов пусковых реле или реле времени, замыкающих цепь обмотки промежуточного реле. Помимо того, ограничение напряжения и тока, питающих реле 4, уменьшает его потребление при больших кратностях тока к. з.

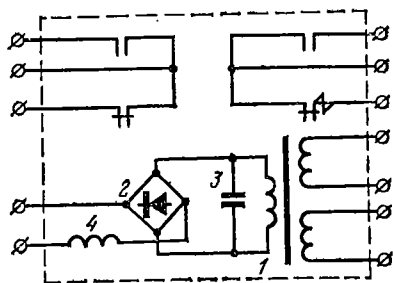


Рис. 4-23. Токовое промежуточное реле типа РП-341.

Конденсатор 3, подключенный параллельно вторичной обмотке трансформатора, сглаживает кривую вторичного тока. Реле приходит в действие при замыкании обмотки 4 контактами реле времени (рис. 4-20) или непосредственно пусковыми реле защиты.

Ток срабатывания реле равен 2,5 или 5 А в зависимости от соединения первичных обмоток трансформатора.

Потребление реле зависит от тока в первичной обмотке реле. При двойном токе $I_{с.р.}$ потребление равно 5 Вт. Наибольшего значения оно достигает при разомкнутой вторичной цепи трансформатора 1.

Переключающие контакты могут переключать 150 А переменного тока и устроены, как показано на рис. 4-19.

Схемы защит с независимой характеристикой имеют несколько разновидностей.

В схеме на рис. 4-20 вспомогательные реле 2 и 3 и катушка отключения 4 включены на разность токов двух фаз. Такое включение упрощает оперативную цепь, так как позволяет применять

по одному промежуточному реле и реле времени, и одну катушку отключения. Но схема с включением вспомогательных реле и катушки отключения на разность токов двух фаз не применима для защит, которые должны действовать при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток λ/Δ .

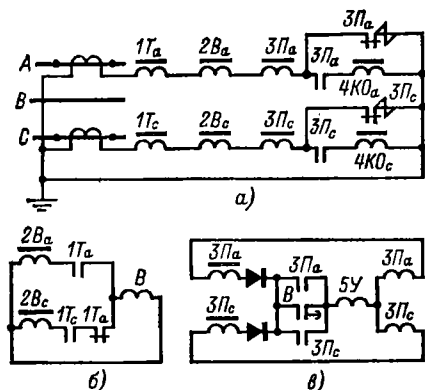


Рис. 4-24. Двухфазная схема защиты с независимой характеристикой для выключателей с двумя катушками отключения.

а — токовые цепи и цепи отключения; б — вторичная цепь реле времени; в — вторичная цепь промежуточного реле.

Защиты, предназначенные для действия за трансформаторами с соединением λ/Δ , должны выполняться по двухфазной схеме с самостоятельным комплектом пусковых реле, вспомогательных реле и катушки отключения в каждой фазе (рис. 4-24; а). Реле времени типов РВМ-12 и РВМ-13 имеют две первичные обмотки, что позволяет использовать одно реле для двух фаз. Для этого реле В (РВМ) включается на сумму токов $\dot{I}_a + \dot{I}_c$. Но при этом оно не может действовать при двухфазных к. з. между фазами А и С, когда $\dot{I}_a + \dot{I}_c = 0$. Для

устранения этого недостатка необходимо размыкать цепь одной из обмоток при одновременном действии обоих пусковых реле, как показано на рис. 4-24, б. Указанная операция выполняется с помощью нормально замкнутого контакта $1T_a$ реле $1T_a$.

Расчет защиты по схеме с дешунтированием катушки отключения выполняется для определения тока срабатывания пусковых реле и проверки надежности действия остальных элементов, питающихся от трансформаторов тока.

Расчет состоит из четырех частей:

1) Выбирается первичный и вторичный токи срабатывания токовых пусковых реле ($I_{с.з.}$ и $I_{с.р.}$) по выражениям (4-4) — (4-6). Проверка погрешности трансформаторов тока производится для защиты с независимой характеристикой при $I_{с.з.}$, а для зависимых — при токе к. з., при котором задается время действия защиты. При этом сопротивление обмоток реле времени и промежуточных реле z_p принимается наибольшим, т. е. при разомкнутой вторичной цепи трансформаторов этих реле.

2) Проверяется надежность работы вспомогательных реле и катушек отключения после их дешунтирования.

Для надежного действия катушки отключения после дешунтирования необходимо, чтобы вторичный ток трансформаторов тока I'_2 был меньше величины

$$I'_2 = k_H I_{с.к.о.}, \quad (4-19)$$

где $I_{с.к.о.}$ — ток срабатывания катушки отключения; k_H — коэффициент надежности, равный 1,2 — 1,4.

Аналогичным путем определяется условие надежной работы вспомогательных реле, но их чувствительность значительно выше чувствительности КО. Поэтому расчетным является уравнение (4-19).

Соответствующий току I_2' первичный ток с учетом погрешности трансформаторов тока ($I_{\text{нам}}$) равен:

$$I_1' = (I_2' + I_{\text{нам}}) n_T = (k_H I_{\text{с.к.о}} + I_{\text{нам}}) n_T. \quad (4-20)$$

Чтобы обеспечить надежное действие катушки отключения при срабатывании защиты, ток срабатывания защиты должен быть равен или больше полученного по формуле (4-20) тока I_1' :

$$I_{\text{с.з}} \geq I_1' = (k_H I_{\text{с.к.о}} + I_{\text{нам}}) n_T. \quad (4-21)$$

3) Проверяется отсутствие возврата реле РТ (ИТ) и РП-341 после дешунтирования катушек отключения (КО).

Уменьшение вторичного тока после дешунтирования КО не должно вызвать возврата реле (РТ-85 или РТ-90 или РП-341), осуществляющего дешунтирование.

Для этого необходимо, чтобы вторичный ток I_2'' , проходящий по реле после дешунтирования КО, удовлетворял условию

$$I_2'' \geq k_H I_{\text{воз}} = k_H k_{\text{воз}} I_{\text{с.р}},$$

где $I_{\text{воз}}$ и $I_{\text{с.р}}$ — ток возврата и ток срабатывания дешунтирующего реле; k_H — коэффициент надежности, равный 1,2.

Как и в предыдущем случае, соответствующий первичный ток

$$I_1'' = (k_H I_{\text{воз}} + I_{\text{нам}}) n_T. \quad (4-22)$$

Для исключения возврата дешунтирующего реле после расшунтирования КО необходимо, чтобы первичный ток возврата реле отвечал условию $I_{\text{воз}} \leq I_1''$.

Погрешность или ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ может быть найден по экспериментальной характеристике $U_2 = f(I_2)$ (см. § 3-3), по кривым погрешностей трансформаторов тока (см. рис. 4-16) или по кривым намагничивания трансформатора тока (рис. 4-25).

В последнем случае подсчитывается величина вторичной э. д. с. тока $E_2 = k_H I_{\text{с.к.о}} (z_{2T} + z_{2L})$, затем определяется максимальная индукция $B_m = \frac{E_2 \cdot 10^8}{4,44 f w_2 S}$; по кривой намагничивания (рис. 4-25) определяется удельное значение $I_{\text{нам}} w_{\text{уд}}$. Зная длину пути магнитного потока l , находим ток намагничивания:

$$I_{\text{нам}} = \frac{[(I_{\text{нам}} w_2)_{\text{уд}}] l}{w_2}.$$

4) Проверяется надежность действия контактов реле дешунтирующих КО. Зная, что контакты реле РТ-85 и РП-341 могут переключать ток до 150 А при условии, что сопротивление КО не превышает 4,5 Ом, получаем условия надежной работы контактов:

$$I_{2\text{макс}} = \frac{I_{\text{к.макс}}}{n_T} \leq 150 \text{ А}, \quad (4-23)$$

где $I_{\text{к.макс}}$ — максимальный ток к. з., проходящий по защищаемому участку.

Если условие (4-23) не выполняется, необходимо определить $I_{2\text{макс}}$ с учетом $I_{\text{нам}}$, т. е. насыщения.

Если и в этом случае условие (4-23) не обеспечивается, необходимо увеличить n_T или применить другие схемы оперативного переменного тока.

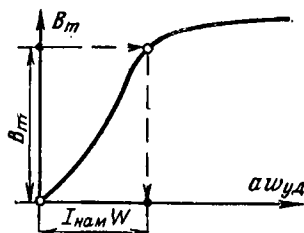


Рис. 4-25. Характеристика намагничивания трансформаторов тока $B_m = f(a W_{\text{уд}})$.

В тех случаях, когда применяются приставки к приводам выключателей, имеющие незначительное потребление катушек отключения KO , погрешности трансформаторов тока после дешунтирования KO получаются меньше 10%. Тогда расчет ведется по приведенным выше формулам (4-21) и (4-22), но $I_{\text{нам}}$ принимается в них равным нулю.

д) Схемы с питанием оперативных цепей защиты от блоков питания

На рис. 4-26 приведена схема двухфазной максимальной защиты с питанием вспомогательного реле 2, 3, 4 и катушки отключения KO выпрямленным током от блока питания $БПТ$. Поскольку выпрямленное напряжение является постоянным, схемы на выпрямленном токе выполняются так же, как и схемы на постоянном токе. В качестве вспомогательных реле (времени, промежуточных, указательных) используются обычные реле постоянного тока.

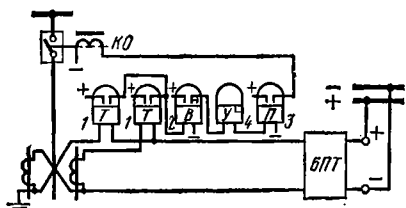


Рис. 4-26. Схема двухфазной защиты с питанием оперативных цепей от блока БПТ.

Главным вопросом при выполнении защит на выпрямленном токе являются способы (схемы) подключения блоков питания $БП$ к трансформаторам тока и напряжения.

Основным источником питания для защит от к. з. служит токовый блок $БПТ$. Блок напряжения $БПН$ является дополнительным и обеспечивает необходимую мощность и напряжение при малых значениях тока к. з. Блок напряжения может не применяться, если токовый блок обеспечивает надежное действие защиты. Схемы включения токовых блоков должны выбираться из условия, чтобы на выходе блока имелось достаточное напряжение при всех возможных видах повреждения на защищаемом элементе.

В сети с изолированной нейтралью для защит, не рассчитанных на действия при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток Δ/Δ , применяется включение блоков $БПТ$ на разность двух токов $\dot{I}_a - \dot{I}_c$ по рис. 4-26.

При необходимости действия защиты при к. з. за трансформаторами с соединением обмоток Δ/Δ устанавливается второй токовый блок, включаемый на ток I_b или разность токов $\dot{I}_a - \dot{I}_c$. Выходные цепи обоих блоков включаются параллельно (рис. 4-27, а).

При соединении трансформаторов тока в двухфазную звезду второй блок включается в общий провод, где проходит ток отсутствующей фазы I_b .

Аналогичные схемы из двух токовых блоков применяются в сети с глухозаземленной нейтралью.

Блок напряжения включается на линейное напряжение (рис. 4-27, б). Принципиальная схема комбинированного блока тока и напряжения БП-10 приведена на рис. 4-28.

Блоки питания могут устанавливаться на каждом присоединении для питания только его защит или использоваться как

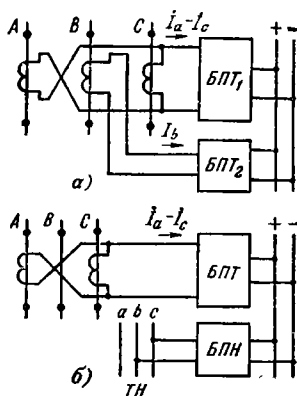


Рис. 4-27. Схемы включения блоков питания.

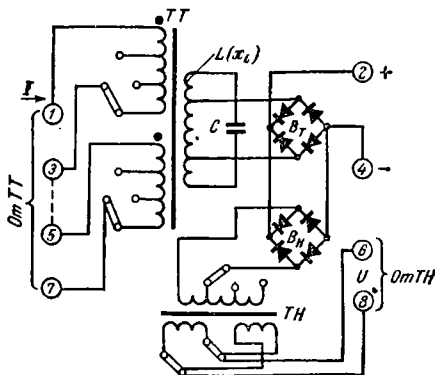


Рис. 4-28. Комбинированный блок питания тока и напряжения типа БП-10.

групповые с питанием защиты нескольких присоединений. Для надежного действия защиты уровень напряжения на выходных зажимах блоков питания должен быть достаточным для работы реле времени, промежуточных реле и катушки отключения. С учетом падения напряжения в соединительных проводах это напряжение должно быть не меньше 0,8 — 0,9 номинального значения 110 или 220 В при всех режимах и всех видах к. з.

Выполнение этого условия проверяется расчетами по характеристикам зависимости выходного напряжения от тока для токовых блоков и от напряжения для блоков напряжения.

В токовых блоках принимаются специальные меры для стабилизации выходного напряжения и повышения отдаваемой мощности [Л. 80]. С этой целью установлен конденсатор C (рис. 4-28), который подбирается так, чтобы в сочетании с индуктивностью L вторичной обмотки промежуточного трансформатора тока ТТ обеспечивались условия феррорезонанса (опрокидывания), наступающие при некотором токе $I'_{вх}$, когда $x_L = x_C$. Параметры блока подобраны таким образом, чтобы феррорезонанс наступал при входном токе $I'_{вх}$ около 5 А (рис. 4-29).

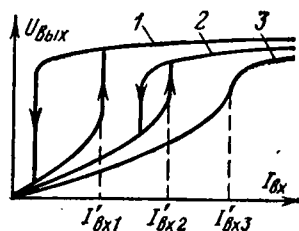


Рис. 4-29. Характеристики $U_{вых} = f(I_{вх})$ токового блока с феррорезонансным контуром для разных нагрузок блока (1, 2, 3).

При токах, превышающих $I'_{\text{вх}}$, т. е. за пределом точки феррорезонанса (опрокидывания), стабилизируется величина выходного напряжения $U_{\text{вых}}$, улучшается форма кривой $U_{\text{вых}}$ за счет уменьшения в ней гармонических составляющих и уменьшается реактивная нагрузка промежуточного, а следовательно, и основных трансформаторов тока.

Отечественная промышленность выпускает комбинированные блоки БП-10 мощностью 40 Вт, блоки тока БПТ-100 мощностью примерно 240 Вт и БПТ-1002 кратковременной мощностью до 1500 Вт, блоки напряжения БПН-100 и БПН-1002. Все блоки рассчитаны в среднем на 110 или 220 В. Тип блока выбирается в зависимости от величины нагрузки. В Горэнерго разработаны и применяются блоки питания с магнитным суммированием токов и напряжения, питающих блоки.

е) Схемы защиты с использованием энергии заряженного конденсатора для питания оперативных цепей

Принципы питания оперативных цепей защиты от предварительно заряженных конденсаторов были освещены в § 1-9, в.

На рис. 4-30 изображена схема максимальной токовой защиты, в которой отключение выключателя осуществляется за счет энергии, запасенной в конденсаторе C . Схема выполнена с помощью двух токовых реле и токового реле времени, соединенных по обычной схеме. Конденсатор C находится в заряженном состоянии. Заряд его производится зарядным устройством УЗ-400, которое питается

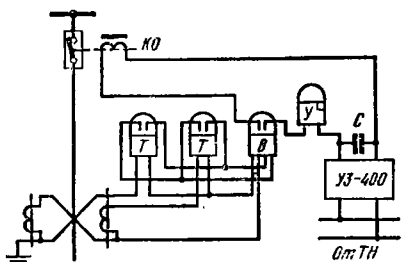


Рис. 4-30. Схема защиты с питанием оперативных цепей от заряженного конденсатора.

от трансформатора напряжения или от трансформатора собственных нужд. При к. з. срабатывают пусковые реле, они замыкают цепь обмотки реле времени. Последнее с выдержкой времени замыкает конденсатор C на катушку отключения $КО$. Конденсатор C разряжается, и ток разряда приводит в действие $КО$.

Зарядное устройство УЗ-400 (рис. 4-31) состоит из повышающего трансформатора $ТН$, выпрямителя $В$ и двух вспомогательных реле: поляризованного $РП$ и реле минимального напряжения $РН$.

Напряжение от трансформатора напряжения подается на зажимы 2—8; оно повышается до 400 В, выпрямляется и подается через размыкающие контакты реле $РН$ на выходные зажимы 5 — 7. К этим зажимам подключается конденсатор C . Повышение напряжения до 400 В позволяет уменьшить емкость конденсатора C ,

Напряжение от трансформатора напряжения подается на зажимы 2—8; оно повышается до 400 В, выпрямляется и подается через размыкающие контакты реле $РН$ на выходные зажимы 5 — 7. К этим зажимам подключается конденсатор C . Повышение напряжения до 400 В позволяет уменьшить емкость конденсатора C ,

так как энергия, запасенная конденсатором, пропорциональна квадрату напряжения: $W = U^2 C / 2$.

Выпрямитель B необходим для заряда конденсатора, поскольку осуществить его заряд до стабильного уровня переменным током не представляется возможным. Реле $РП$ служит для контроля наличия напряжения на выходных зажимах 5 — 7. При исчезновении напряжения вследствие повреждения конденсатора или выпрямителя B или при исчезновении питающего напряжения ток в реле $РП$ пропадает и оно срабатывает.

Конденсатор C_1 сглаживает пульсацию выпрямленного напряжения. Реле $РН$ контролирует наличие напряжения на входе зарядного устройства и отключает конденсатор C от зарядного устройства при исчезновении напряжения. Этим предупреждается разряд конденсатора C через сопротивление источника питания. Устройство УЗ-400 рассчитано на заряд конденсатора емкостью до 500 мкФ. Для действия привода ПС-10 необходим конденсатор 75 мкФ.

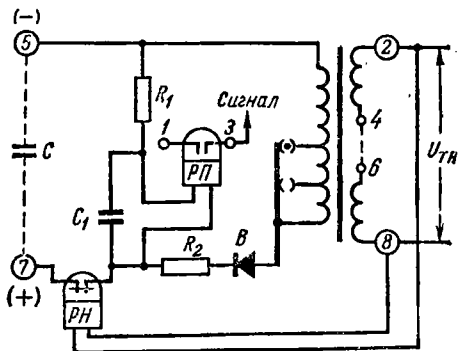


Рис. 4-31. Зарядное устройство УЗ-400.

4-9. МАКСИМАЛЬНАЯ ЗАЩИТА С РЕЛЕ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

В городских и сельских распределительных сетях 6 — 10 кВ, а также на промышленных предприятиях в целях удешевления и

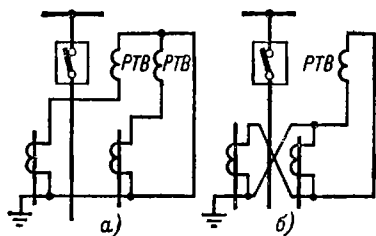


Рис. 4-32. Схемы защиты с реле прямого действия РТВ.

а — схема неполной звезды; б — схема включения на разность токов двух фаз.

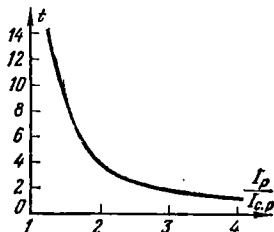


Рис. 4-33. Характеристика времени действия реле РТВ.

упрощения защиты применяются реле прямого действия для выполнения токовых максимальных защит. Отечественная промышленность выпускает токовое реле прямого действия — мгновенные

типа РТМ и с ограниченно зависимой характеристикой времени действия типа РТВ. Эти реле встраиваются в грузовые и пружинные приводы. Принцип действия реле прямого действия пояснен на рис. 1-9.

Схемы максимальной защиты прямого действия отличаются простотой и небольшой стоимостью. На рис. 4-32 показаны двухфазные схемы с реле типа РТВ.

Характеристика времени действия реле приведена на рис. 4-33.

Реле РТВ представляет собой электромагнитное реле с вытягивающимся якорем (рис. 4-34). Нормально под действием пружины 3 якорь реле 2 находится в нижнем положении.

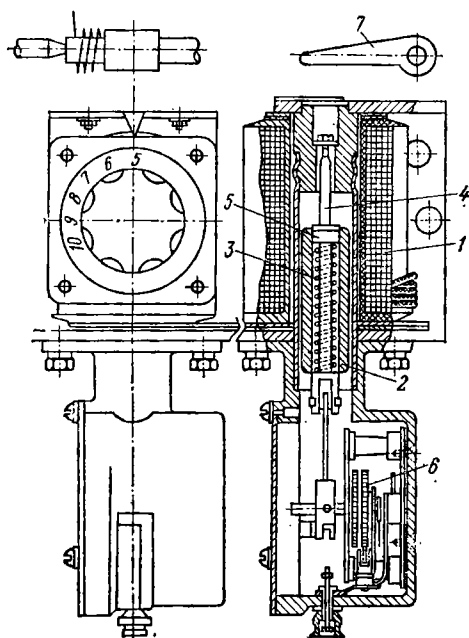


Рис. 4-34. Токовое реле прямого действия типа РТВ.

При появлении тока $I_p \geq I_{с.р}$ в обмотке реле 1 возникает электромагнитная сила F_a , превышающая силу пружины 3, F_p , якорь реле вытягивается и сжимает пружину 3, которая давит на стопорное кольцо 5 ударника 4, стремясь поднять последний вверх. Однако движение ударника несвободно, оно тормозится часовым механизмом 6. Чем больше ток I_p , тем больше сжимается пружина под действием силы F_a и тем быстрее будет двигаться часовой механизм.

Следовательно, время, необходимое для перемещения ударника из начального положения до момента удара по отключающему

рычагу 7 привода, зависит от величины тока I_p . При $I_p \approx 3I_{с.р}$ пружина сжимается до предела и дальнейшие увеличения тока не сопровождаются изменением скорости движения часового механизма. При этом токе наступает независимая часть характеристики реле (рис. 4-33). В конце хода ударник 4 расцепляется с часовым механизмом. Благодаря этому его скорость и обусловленная ею кинетическая энергия ударника резко увеличиваются и он с возросшей силой ударяет по рычагу 7, отключая выключатель. Конструкция реле более подробно описывается в [Л. 26, 30].

Недостатки реле прямого действия отмечались в § 1-8. Погрешность по времени действия достигает $\pm 0,3$ с. Поэтому при выборе выдержки времени на защите с РТВ степень селективности Δt

принимается равной 0,8 с. Обмотка реле имеет значительное потребление около 50 В·А при токе срабатывания. Поэтому трансформаторы тока, питающие реле прямого действия, достаточно сильно загружены. По мере втягивания якоря 2 и перемещения ударника 4 вверх потребление реле растет. Точность трансформаторов тока должна быть обеспечена при токе срабатывания реле.

4-10. ОБЩАЯ ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Достоинствами максимальной токовой защиты являются ее простота, надежность и небольшая стоимость по сравнению с другими видами защиты. По своему принципу максимальная токовая защита обеспечивает селективность в радиальных сетях с односторонним питанием. Однако в некоторых случаях ее удастся применять и в более сложных сетях, имеющих двустороннее питание.

К недостаткам максимальной защиты относятся:

а) большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания, в то время как именно вблизи шин электростанции по условию устойчивости необходимо быстрое отключение к. з.;

б) недостаточная чувствительность при к. з. в разветвленных сетях с большим числом параллельных цепей и значительными токами нагрузки.

Максимальная токовая защита получила наиболее широкое распространение в радиальных сетях всех напряжений; в сетях 10 кВ и ниже она является основной защитой.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ТОКОВЫЕ ОТСЕЧКИ

5-1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК

Отсечка является разновидностью токовой защиты, позволяющей обеспечить быстрое отключение к. з. Токковые отсечки подразделяются на отсечки мгновенного действия и отсечки с выдержкой времени (около 0,3—0,6 с).

Селективность действия токовых отсечек достигается ограничением их зоны работы так, чтобы отсечка не действовала при к. з. на смежных участках сети, защита которых имеет выдержку времени, равную или больше, чем отсечка. Для этого ток срабатывания отсечки должен быть больше максимального тока к. з., проходящего через защиту при повреждении в конце участка, за пределами которого отсечка не должна работать (точка М участка АМ на рис. 5-1). Такой способ ограничения зоны действия основан на том, что ток к. з. I_k зависит от величины сопротивления до места повреждения (рис. 5-1).

Действительно, ток к. з. в какой-либо точке рассматриваемого участка линий

$$I_K = \frac{E_c}{x_c + x_{л.к}} = \frac{E_c}{x_c + x_y l_K}, \quad (5-1)$$

где E_c — эквивалентная э. д. с. генераторов системы; x_c и $x_{л.к}$ — сопротивление системы и участка линии до точки к. з. (активная составляющая сопротивлений, для упрощения, не учитывается); x_y — удельное сопротивление линии, Ом/км; l_K — длина защищаемой линии от ее начала до точки к. з.

Из (5-1) следует, что при удалении точки к. з. от источника питания (или от места расположения защиты) сопротивление $x_{л.к}$ растет (так как $x_{л.к} \equiv l_K$), а ток к. з. соответственно уменьшается, как показано на рис. 5-1.

Если по условиям селективности отсечка не должна действовать при к. з. за точкой M (рис. 5-1), то для обеспечения этого условия необходимо выбрать

$$I_{с.з.} > I_{K(M)}. \quad (5-1a)$$

Тогда при к. з. за точкой M отсечка не будет действовать, а при повреждении в пределах участка AM — будет работать на той части линии AN , где $I_K > I_{с.з.}$.

Таким образом, зона действия защиты с током срабатывания, выбранным по условию (5-1a), охватывает только часть линии (AN) и не выходит за пределы участка AM .

Токовые отсечки применяются как в радиальной сети с односторонним питанием, так и в сети, имеющей двустороннее питание.

Для обеспечения расчетной зоны действия отсечки трансформаторы тока, питающие ее цепи, должны работать при токе срабатывания отсечки (т. е. при $I_p = I_{с.з.}$) с погрешностью ϵ или $\Delta I \leq 10\%$.

5-2. СХЕМЫ ОТСЕЧЕК

Приципиальные схемы отсечек мгновенных (без выдержки времени) и с выдержкой времени на постоянном оперативном токе изображены на рис. 5-2, а и б.

В сети с глухозаземленной нейтралью от всех видов к. з. применяются трехфазные схемы. В качестве защиты от междуфазных к. з. используется двухфазная схема неполной звезды.

В сети с изолированной нейтралью или заземленной через большое сопротивление применяются двухфазные схемы, подобные схемам на рис. 4-5, а и б.

Трехлинейные схемы отсечек на постоянном оперативном токе аналогичны схемам, приведенным на рис. 4-2 и 4-5.

Все соображения о достоинствах и недостатках этих схем, изложенные в § 4-3, относятся и к схемам отсечек.

Так же как и максимальные защиты, отсечки выполняются на постоянном и переменном оперативном токе, а также с помощью реле прямого действия по схемам, приведенным на рис. 4-20, 4-26, 4-30, 4-32.

Схемы отсечек с выдержкой времени полностью совпадают со схемами максимальных защит с независимой выдержкой времени.

Схемы отсечек без выдержки времени отличаются от указанных схем максимальной защиты отсутствием реле времени.

Ниже рассматриваются способы выбора уставок различных видов отсечек.

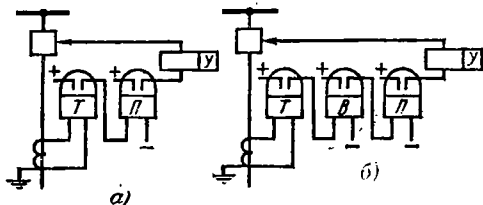


Рис. 5-2. Одполюсная схема токовой отсечки.

а — мгновенной с $t = 0$; б — с выдержкой времени.

5-3. ОТСЕЧКИ МГНОВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ НА ЛИНИЯХ С ОДНОСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

а) Ток срабатывания отсечки

По условию селективности с защитами остальной сети отсечка без выдержки времени (с $t_3 = 0$) не должна работать за пределами защищаемой линии AB (рис. 5-3). Ток срабатывания мгновенной отсечки должен удовлетворять условию (5-2) при к. з. в конце защищаемой линии AB , т. е. в точке M (рис. 5-3). В соответствии с этим принимается, что

$$I_{с.з} = k_n I_{K(M) \max}, \quad (5-2)$$

где $I_{K(M) \max}$ — максимальный ток к. з. в фазе линии при к. з. на шинах подстанции B (точка M на рис. 5-3); k_n — коэффициент надежности, учитывающий погрешность в расчете тока к. з. $I_{K(M) \max}$ и погрешность в токе срабатывания реле.

Ток к. з. $I_{K(M) \max}$ рассчитывается для таких режимов работы системы и видах повреждений, при которых он оказывается наибольшим. Поскольку собственное время действия отсечки равно 0,02–0,01 с, то ток $I_{K(M) \max}$ рассчитывается для начального момента времени ($t = 0$) и принимается равным действующему значению периодической составляющей. При расчете тока к. з. генераторы замещаются сверхпереходным сопротивлением x_d' .

В схемах отсечки, где токовые реле действуют непосредственно на отключение без промежуточного реле, время действия

отсечки может достигать одного периода (т. е. 0,02 с). В этом случае следует учитывать апериодическую составляющую тока к. з., умножая ток $I_{K(M)max}$ на коэффициент $k_a = 1,6 \div 1,8$.

У отсечек для защиты линий с токовыми реле типа РТ коэффициент надежности $k_n = 1,2 \div 1,3$. Для отсечки с реле типа

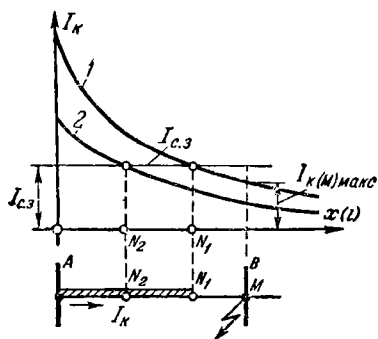


Рис. 5-3. Графический метод определения зоны действия мгновенной отсечки.

1 — максимальный ток I_K ; 2 — минимальный ток I_K .

спада тока по длине линии. Чем больше различаются токи I_K при к. з. в начале и конце линии, тем больше получается зона, охватываемая отсечкой. Зону действия отсечки можно также определить по формуле

$$x_{отс} \% = \frac{100}{x_d} \left(\frac{E_c}{I_{c.з}} - x_c \right), \quad (5-3)$$

где $x_{отс}$ — зона действия отсечки, выраженная в процентах от сопротивления защищаемой линии; x_d — сопротивление защищаемой линии; x_c — сопротивление системы [см. рис. 5-1], $I_{c.з}$ — ток срабатывания отсечки, выбранный согласно (5-2).

Правила устройства электроустановок рекомендуют применять отсечку, если ее зона действия охватывает не меньше 20% защищаемой линии.

Для устранения мертвой зоны направленных защит отсечка применяется и при меньшей зоне действия. При схеме работы линии блоком с трансформатором (рис. 5-4) отсечку отстраивают от тока к. з. при к. з. за трансформатором в точке K_1 . В этом случае отсечка защищает всю линию и оказывается весьма эффективной.

РТ-80 и РТ-90, которые имеют погрешность в токе срабатывания 20—25%, принимается повышенный $k_n = 1,5$.

Зона действия отсечки определяется графически, как показано на рис. 5-3. Обычно строятся кривые тока к. з. в зависимости от расстояния l до точки к. з. $I_K = f(l)$ для максимального и минимального режимов (кривые 1 и 2 на рис. 5-3), и по точке пересечения их с прямой $I_{c.з}$ находится конец зоны отсечки в максимальном и минимальном режимах (AN_1 и AN_2).

Зона действия отсечки зависит от характера (крутизны кривой)

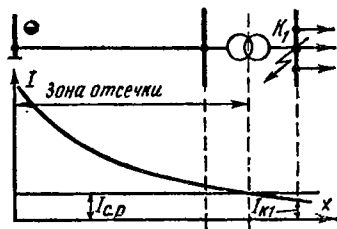


Рис. 5-4. Зона действия отсечки блока линия — трансформатор.

Вследствие простоты отсечки она применяется в качестве дополнительной защиты при зоне действия, меньшей 20 %, если основная защита линии имеет мертвую зону.

6) Время действия отсечки

Время действия мгновенной отсечки складывается из времени срабатывания токовых и промежуточного реле (рис. 5-2, а). При быстродействующих промежуточных реле (0,02 с) отсечка срабатывает в течение времени $t_3 = 0,04 \div 0,06$ с. Промежуточное реле облегчает работу контактов токовых реле и позволяет не учитывать аperiodическую составляющую тока к. з., поскольку последняя затухает очень быстро (за 0,02—0,03 с).

На линиях, защищенных от перенапряжений трубчатыми разрядниками, отсечка может срабатывать при их действии. Время работы разрядников составляет около 0,01—0,02 с. При каскадном действии разрядников оно увеличивается до 0,04—0,06 с. Применением промежуточного реле с временем действия $t = 0,06 \div 0,08$ с удастся отстроить отсечку от работы разрядников.

5-4. НЕСЕЛЕКТИВНЫЕ ОТСЕЧКИ

Неселективной отсечкой называется мгновенная отсечка, действующая за пределами своей линии. Такая отсечка применяется для быстрого отключения к. з. в пределах всей защищаемой линии в тех случаях, когда это необходимо для сохранения устойчивости. Неселективное действие отсечки при к. з. вне линии исправляется при помощи АПВ, включающего обратно-неселективно отключившуюся линию. Пример применения неселективной отсечки приведен на рис. 5-5.

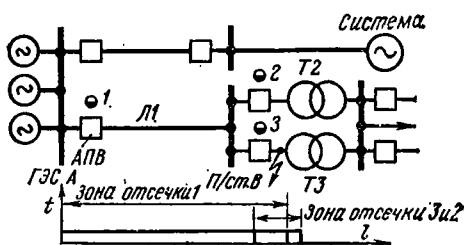


Рис. 5-5. Неселективная отсечка в сочетании с АПВ.

Для сохранения устойчивости работы генераторов ГЭС А на линии Л1 установлена отсечка 1, неселективная по отношению к защите трансформаторов. Ток срабатывания отсечки 1 отстраивается от конца зоны отсечек 2 и 3, установленных на трансформаторах Т2 и Т3, т. е. $I_{с.31} = (1,1 \div 1,2)I_{с.32}$ (или $I_{с.33}$). При такой установке отсечка 1 охватывает защищаемую линию Л1, но не выходит за пределы трансформаторов Т2 и Т3.

При к. з. в каком-либо трансформаторе, например Т3, в пределах зоны действия отсечки 1 последняя срабатывает неселективно одновременно с отсечкой поврежденного трансформатора,

поскольку их время действия одинаково ($t = 0$). В результате этого, кроме трансформатора $TЗ$, неселективно отключается линия $Л1$. При этом пускается АПВ, которое включает обратно-неселективно отключившуюся линию $Л1$ и восстанавливает, таким образом, питание подстанции B .

5-5. ОТСЕЧКИ НА ЛИНИЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

На линии с двусторонним питанием мгновенная отсечка не должна действовать при к. з. за пределами защищаемой линии (в точках K_A и K_B на рис. 5-6). Исходя из этого, ток срабатывания

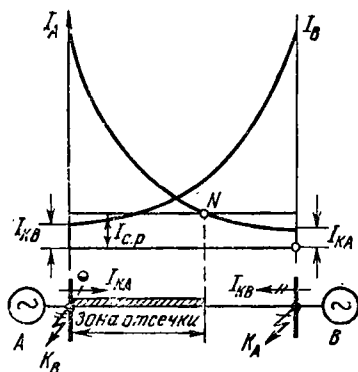


Рис. 5-6. Мгновенные отсечки на линии с двусторонним питанием.

выбирают бóльшим тока I_{KA} , проходящего от генератора A при к. з. на шинах B , и тока I_{KB} , проходящего от генераторов B при к. з. на шинах A (рис. 5-6). Ток срабатывания вычисляется по выражению (5-2), где вместо $I_{н(М)макс}$ подставляется больший из токов I_{KA} или I_{KB} .

При наличии двустороннего питания линии по ней могут проходить токи, обусловленные качаниями генераторов A относительно генераторов B . Во избежание неправильной работы отсечки при качаниях ее ток срабатывания должен устраи-

ваться и от токов качания $I_{кач}$, для чего $I_{с.з}$ должно удовлетворять одновременно с (5-2) условию

$$I_{с.з} = k_H I_{кач. макс}, \quad (5-4)$$

где $k_H = 1,2 \div 1,3$.

Максимальное значение $I_{кач}$ определяется с некоторыми допущениями по формуле (13-3а):

$$I_{кач. макс} = \frac{2E}{x_{AB}},$$

где E — э. д. с. генераторов A и B , для упрощения E_A и E_B считаются равными: $E_A = E_B = E = 1,05 U_{ген}$; x_{AB} — суммарное сопротивление от генераторов A до генераторов B , равное сумме $x_{ГА} + x_c + x_{ГВ}$, при этом $x_{ГА}$ и $x_{ГВ}$ — сверхпереходные сопротивления генераторов A и B (x_d'), x_c — сумма сопротивлений всех остальных элементов, включенных между шинами генераторов A и B .

Ток срабатывания выбирается большим из двух значений, полученных по условиям (5-2) и (5-4). На линиях с двусторонним питанием отсечки ставятся с обеих сторон линии. Очевидно, что

ток срабатывания отсечек на обоих концах линии получается одинаковым. Зона действия каждой отсечки определяется по точке пересечения N прямой тока $I_{с.з}$ с соответствующей кривой тока к. з. Схема отсечки на линии с двусторонним питанием ничем не отличается от схемы на рис. 5-2, а.

5-6. ОТСЕЧКИ С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

Мгновенная отсечка защищает только часть линии; чтобы выполнить защиту всей линии с минимальным временем действия, применяется отсечка с выдержкой времени (рис. 5-2, б). Зона и время действия такой отсечки 1 (рис. 5-7, а, б) согласуются с зоной и временем действия мгновенной отсечки 2 так, чтобы была обеспечена селективность.

Для выполнения этих условий время действия защиты $t_{з1}$ отсечки 1 (рис. 5-7) выбирается на ступень Δt больше $t_{з2}$ отсечки 2:

$$t_{з1} = t_{з2} + \Delta t. \quad (5-5)$$

Практически в зависимости от точности реле времени отсечки 1 $t_{з} = 0,3 \div 0,6$ с.

Зоны действия отсечек 1 и 2 согласуются между собой при условии, что зона действия отсечки 1 должна быть короче зоны работы отсечки 2 (рис. 5-7, в).

В сети с односторонним питанием ток, проходящий через защиты 1 и 2 при к. з. на линии Л2 (точка К), одинаков. Поэтому согласование зон действия защит 1 и 2 можно обеспечить, выбрав $I_{с.з1} > I_{с.з2}$.

При таком соотношении токов срабатывания защит отсечка 1 не будет действовать, если ток к. з. недостаточен для действия отсечки 2. Исходя из этого, принимаем:

$$I_{с.з1} = k_n I_{с.з2}. \quad (5-6)$$

Коэффициент надежности k_n берется равным 1,1—1,2. Зона действия отсечки 1 (AN на рис. 5-7, а) находится, как и в предыдущих случаях, графически для максимального и минимального режима по точке пересечения N.

В сети с двусторонним питанием токи $I_{к1}$ и $I_{к2}$, проходящие через отсечки 1 и 2, неодинаковы (рис. 5-8). Ток $I_{к2} > I_{к1}$, так как $I_{к2} = I_{к1} + I_{к3}$. С учетом этого согласование зон действия отсечек 1 и 2 обычно выполняется графиче-

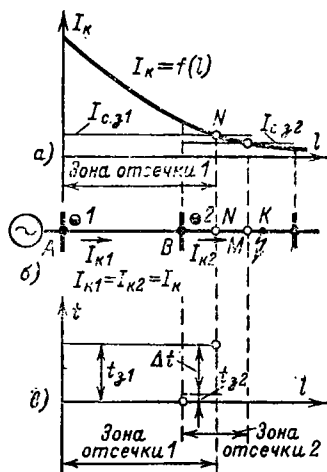


Рис. 5-7. Выбор $I_{с.з}$ отсечки с выдержкой времени на линии с односторонним питанием.

ским способом. Для этой цели (рис. 5-8) строится зависимость I_{K1} и I_{K2} от расстояния l до точки к. з.: $I_K = f(l)$.

По пересечению прямой $I_{c.32}$ с кривой I_{K2} , (точка M) определяется конец зоны действия отсечки 2. От точки M необходимо отстроить отсечку 1. Для этого по кривой I_{K1} находится ток $I_{K1(M)}$, проходящий в защите 1 при к. з. в конце зоны отсечки 2 (точка M). В соответствии с условием (5-2)

$$I_{c.31} = k_{II} I_{K1(M)}. \quad (5-6a)$$

Расчет ведется при максимальном значении тока I_{K1} и минимальном значении тока I_{K2} .

Ток $I_{c.3}$ должен быть отстроен также и от тока I_{KA} при к. з. на шинах подстанции A . Зона действия отсечки 1 определяется по точке пересечения $I_{c.31}$ и I_{K1} , т. е. по точке N .

Рис. 5-8. Выбор $I_{c.3}$ отсечки с выдержкой времени на линии с двусторонним питанием.

Схемы отсечки с выдержкой времени выполняются так же, как и схемы максимальных защит с независимой характеристикой (рис. 4-2). Токовая отсечка с выдержкой времени охватывает полностью защищаемую линию и частично следующий участок.

Схемы отсечки с выдержкой времени выполняются так же, как и схемы максимальных защит с независимой характеристикой (рис. 4-2). Токовая отсечка с выдержкой времени охватывает полностью защищаемую линию и частично следующий участок.

5.7. ТОКОВАЯ ТРЕХСТУПЕНЧАТАЯ ЗАЩИТА

Сочетая максимальную защиту 1 с мгновенной отсечкой 3 и отсечкой с выдержкой времени 2, можно получить трехступенчатую защиту, обеспечивающую быстрое отключение поврежде-

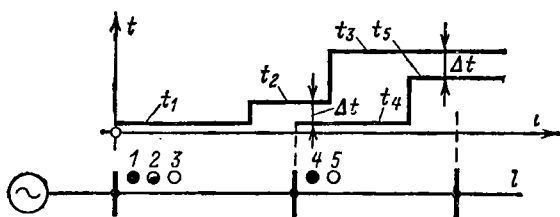


Рис. 5-9. Характеристика трехступенчатой токовой защиты.

ний на защищаемой линии $Л1$ и резервирующую защиту 4 и 5 следующего участка. Характеристика времени действия трехступенчатой токовой защиты показана на рис. 5-9. Протяженность зон меняется в зависимости от режима работы системы.

5-8. ОЦЕНКА ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК

Токковые отсекки мгновенного действия являются самой простой защитой. Быстрота их действия в сочетании с простотой схемы и обслуживания составляет весьма важное преимущество этих защит.

Недостатками мгновенной отсекки являются: неполный охват зоной действия защищаемой линии и непостоянство зоны действия под влиянием сопротивлений в месте повреждения и изменений режима системы, однако последнее не оказывает существенного влияния в мощных энергосистемах.

Отсекка с выдержкой времени позволяет обеспечить достаточно быстрое ($t_z \approx 0,5$ с) отключение повреждений на защищаемой линии. Сочетание отсечек и максимальной защиты позволяет получить трехступенчатую защиту, которая во многих случаях успешно заменяет более сложные защиты.

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ И СХЕМЫ ИХ СОЕДИНЕНИЙ

6-1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

Для питания защит используются однофазные и трехфазные трансформаторы напряжения, причем последние, как правило, с пятистержневым магнитопроводом. По стандарту, принятому в СССР, трансформаторы напряжения выполняются на вторичное номинальное напряжение 100 В независимо от величины первичного напряжения.

Маркировка выводов обмоток трансформатора напряжения выполняется по тому же правилу, что и трансформаторов тока (см. § 3-4), а именно: если первичный ток направлен из сети к началу H первичной обмотки, то за начало h вторичной обмотки принимается тот конец ее, из которого вторичный ток выходит в нагрузку (рис. 6-4).

Согласно принятому в СССР стандарту начала и концы обмоток трансформаторов напряжения обозначаются так же, как и у силовых трансформаторов.

На основании соображений, изложенных в § 3-5, векторы первичного и вторичного напряжений могут изображаться либо

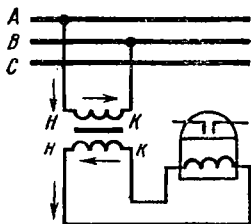


Рис. 6-1. Схема включения трансформатора напряжения.

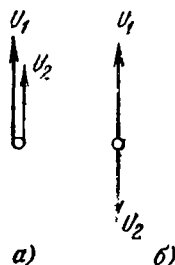


Рис. 6-2. Изображение векторов напряжений.

совпадающими (рис. 6-2, а), либо сдвинутыми на 180° (рис. 6-2, б). В дальнейшем будем придерживаться первого способа.

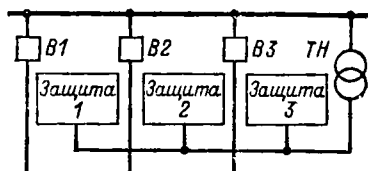


Рис. 6-3. Схема питания защиты от шинного трансформатора напряжения.

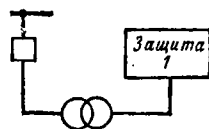


Рис. 6-4. Схема питания защиты от линейного трансформатора напряжения.

Для питания защит трансформаторы напряжения могут устанавливаться на шинах электростанций или подстанции и питать защиты всех присоединений (рис. 6-3) или устанавливаться на каждом присоединении и питать защиту только этого присоединения (рис. 6-4).

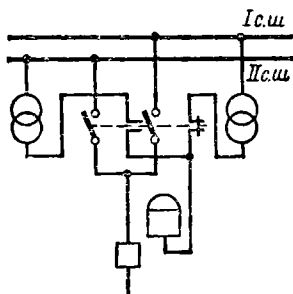


Рис. 6-5. Переключение цепей напряжения защиты с одного трансформатора на другой вспомогательными контактами шинных разъединителей.

Первый способ экономичнее второго, так как требует меньше трансформаторов напряжения. Недостаток первого способа состоит в том, что при переключении присоединения с одной системы шин на другую необходимо производить переключение питания его защиты на трансформатор напряжения другой системы шин. Такое переключение делается автоматически при операциях с разъединителями (рис. 6-5) или вручную — переключателями.

6-2. ПОГРЕШНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПЯЖЕНИЯ

Трансформатор напряжения работает с погрешностью, искажающей вторичное напряжение как по величине, так и по фазе.

В «идеальном» трансформаторе напряжения, работающем без погрешностей, вторичное напряжение

$$\dot{U}_2 = \frac{U_1}{n_n}, \quad (6-1)$$

где $\dot{U}_1$ — напряжение, подведенное к зажимам первичной обмотки (первичное напряжение); n_n — коэффициент трансформации «идеального» трансформатора напряжения, равный отношению числа витков первичной обмотки к числу витков вторичной.

Однако за счет падения напряжения ΔU в первичной и вто-

ричной обмотках действительное значение вторичного напряжения будет равно:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{n_{11}} - \Delta \dot{U}, \quad (6-2)$$

что вытекает из эквивалентной схемы замещения трансформатора напряжения (рис. 6-6, а).

Из этой же схемы следует, что

$$\Delta \dot{U} = \dot{I}'_{\text{нам}} z'_1 + \dot{I}_2 (z'_1 + z_2). \quad (6-2a)$$

Таким образом, падение напряжения в обмотках трансформатора напряжения $\Delta \dot{U}$ обуславливает появление погрешности, искажающей величину и фазу $\dot{U}_2$ (рис. 6-6, б), по сравнению с расчетным напряжением $\dot{U}_2 = \dot{U}_1 / n_{11} = \dot{U}'_1$ по выражению (6-1).

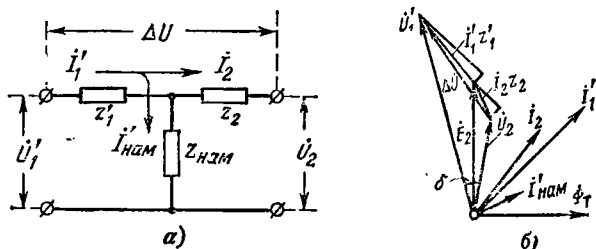


Рис. 6-6. Схема замещения (а) и векторная диаграмма (б) трансформатора напряжения. Первичный ток, напряжение и сопротивление приведены к числу витков вторичной обмотки.

Для уменьшения погрешности трансформатора напряжения [см. формулу (6-2a)] необходимо уменьшать сопротивление обмоток z_1 и z_2 , ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ и ток нагрузки, т. е. вторичный ток I_2 .

Допустимые погрешности нормируются при номинальном напряжении, соответственно чему трансформаторы напряжения подразделяются на три класса: 0,5; 1 и 3. Один и тот же трансформатор напряжения может работать в различном классе точности в зависимости от величины его нагрузки.

Заводы СССР обычно указывают номинальную мощность, подразумевая под ней максимальную нагрузку, которую может питать трансформатор напряжения в гарантированном классе точности. При превышении номинальной мощности погрешности трансформатора напряжения выходят за гарантированные пределы. Кроме того, для трансформаторов напряжения указывается максимальная мощность по условиям нагрева, которая обычно значительно превосходит его номинальную мощность.

Погрешность по величине вторичного напряжения принято оценивать в процентах:

$$\Delta U\% = \frac{U_2 - \frac{U_1}{n_{\text{н}}}}{U_1/n_{\text{н}}} 100, \quad (6-3)$$

где U_2 — действительное вторичное напряжение.

Погрешность по фазе оценивается углом сдвига δ между векторами первичного и вторичного напряжений (рис. 6-6, б).

6-3. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

Для питания цепей релейной защиты используются между-фазные напряжения и фазные — относительно земли, а также симметричные составляющие этих напряжений.

Ниже рассматриваются типовые схемы соединений трансформаторов напряжения (ТН) и схемы фильтров, позволяющие получить указанные напряжения.

а) Схема соединений трансформаторов напряжения в звезду

Схема, приведенная на рис. 6-7, а, предназначена для получения напряжения фаз относительно земли и междуфазных (линейных) напряжений. Три первичные обмотки трансформатора напряжения $TН1$ соединяются в звезду. Начала каждой обмотки (выводы A, B, C) присоединяются к соответствующей фазе линии, а концы X, Y, Z объединяются в общую точку (нейтраль H_1) и заземляются.

При таком включении к каждой первичной обмотке $TН1$ подводится напряжение фазы линии относительно земли, которое затем трансформируется во вторичные обмотки. Концы вторичных обмоток $TН1$ (x, y, z на рис. 6-7, а) также соединяются в звезду, нейтраль которой H_2 связывается проводом с нулевой точкой H_3 нагрузки (обмотки реле 1, 2, 3).

В приведенной схеме нейтраль первичной обмотки (точка H_1) жестко связана с землей и имеет поэтому ее потенциал, а нейтраль нагрузки H_3 соединена с нейтралью вторичных обмоток H_2 и всегда имеет потенциал точки H_2 .

При такой схеме фазные напряжения на вторичной стороне соответствуют фазным напряжениям относительно земли первичной стороны.

Если по каким-либо причинам первичная нейтраль трансформатора напряжения (H_1) окажется разземленной, как показано на рис. 6-7, б, то ее потенциал станет отличным от потенциала земли.

Из теории электротехники известно [Л. 29, 95], что потенциал изолированной от земли нейтрали, образованной тремя соединенными в звезду одинаковыми сопротивлениями z (какими

являются сопротивления первичных обмоток $TH2$ на рис. 6-7, б), находится в точке O' (рис. 6-7, в), лежащей на пересечении медиан треугольника линейных напряжений.

Векторы напряжений фаз относительно этой точки (называемой нулевой точкой системы линейных напряжений) $\dot{U}'_A, \dot{U}'_B, \dot{U}'_C$

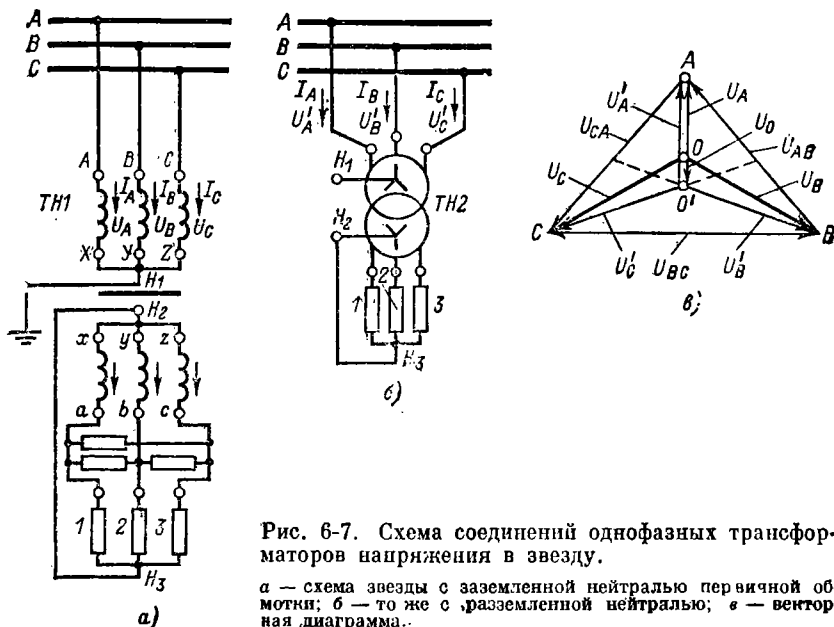


Рис. 6-7. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в звезду.

а — схема звезды с заземленной нейтралью первичной обмотки; б — то же с разземленной нейтралью; в — векторная диаграмма.

обладают особенностью — при всех режимах и к. з. их геометрическая сумма равна нулю:

$$\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0. \quad (6-4)$$

Так как $\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 3\dot{U}_0$ [Л. 32], то из (6-4) следует, что фазные напряжения относительно точки O' не содержат составляющих нулевой последовательности и этим они отличаются от фазных напряжений по отношению к земле.

Справедливость выражения (6-4) доказывается следующим образом: фазные напряжения на $TH-2$ (рис. 6-7, б)

$$\dot{U}'_A = \dot{I}_A z; \quad \dot{U}'_B = \dot{I}_B z; \quad \dot{U}'_C = \dot{I}_C z,$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ — токи в первичных обмотках $TH-2$, а z — сопротивление фазы первой обмотки $TH-2$.

С учетом этого сумма

$$\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = z(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (6-4a)$$

Но поскольку согласно первому закону Кирхгофа $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, то и $\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0$, как это и принято в (6-4).

Таким образом, фазные напряжения U'_A, U'_B, U'_C ТН-2 с незаземленной нейтралью (рис. 6-7, б) могут содержать только те симметричные составляющие, которые удовлетворяют условию (6-4), т. е. прямую и обратную последовательности, сумма векторов каждой из которых равна нулю.

Сумма I_0 не равна нулю, следовательно, эта составляющая отсутствует в напряжениях U' .

В нормальном режиме и при всех к. з., не связанных с землей, $U_0 = 0$. Поэтому в этих случаях потенциалы точек H_1 заземленного и незаземленного ТН (т. е. у ТН1 и ТН2) будут одинаковы. При этом точка O на векторной диаграмме будет совпадать с O' , а фазные напряжения обоих трансформаторов напряжения окажутся равными: $U'_\phi = U_\phi$.

При повреждениях с замыканием на землю появляется U_0 . Потенциал нейтрали H_1 незаземленного ТН2 будет лежать в точке O' , совпадающей с точкой пересечения медиан, а точка O , соответствующая потенциалу заземленной нейтрали ТН1, будет отстоять от O' на величину вектора $\dot{U}_0$.

В этом случае, как это видно из рис. 6-7, в, фазные напряжения относительно земли (точки O)

$$\dot{U}_A = \dot{U}'_A + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_B = \dot{U}'_B + \dot{U}_0; \quad \dot{U}_C = \dot{U}'_C + \dot{U}_0.$$

Сумма

$$\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0, \quad \text{а} \quad \dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C = 0.$$

Аналогичным образом на фазные напряжения влияет обрыв или отсутствие нулевого провода во вторичной цепи.

При отсутствии связи между H_2 и H_3 точка H_3 становится изолированной нейтралью; как было показано выше, сумма напряжений на обмотках реле (1, 2 и 3) во всех случаях будет равна нулю, и, следовательно, на векторной диаграмме потенциал точки H_3 совпадет с точкой O , если принять для простоты, что $n_n = 1$.

Из всего сказанного следует очень важный вывод, что *заземление нейтрали первичной обмотки ТН и наличие нулевого провода во вторичной цепи являются обязательным условием для получения фазных напряжений относительно земли.*

Соединение трансформаторов напряжения по схеме Δ/Δ может выполняться по 6-й и 12-й группам. Типовым является соединение по 12-й группе, показанное на рис. 6-7.

Рассмотренная схема соединений может быть выполнена посредством трех однофазных трансформаторов напряжения или одного трехфазного пятистержневого трансформатора напряжения. Трехфазные трехстержневые трансформаторы напряжения на могут применяться для данной схемы, так как в их магнитопроводе нет пути для замыкания магнитных потоков нулевой последовательности Φ_0 , создаваемых током I_0 в первичных обмотках при замыканиях на землю в сети. В этом случае поток Φ_0 замыкается через воздух по пути с большим магнитным со-

противлением. Это приводит к уменьшению сопротивления нулевой последовательности трансформатора и резкому увеличению тока намагничивания $I_{\text{нам}}$.

Повышенный ток намагничивания вызывает недопустимый нагрев трансформатора, в связи с чем применение трехстержневых трехфазных трансформаторов недопустимо.

В пятистержневых трансформаторах для замыкания потоков Φ_0 служат четвертый и пятый стержни магнитопровода (рис. 6-8).

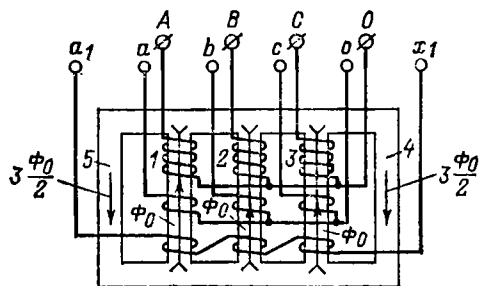


Рис. 6-8. Пути замыкания магнитных потоков нулевой последовательности в трехфазном пятистержневом трансформаторе напряжения.

б) Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в открытый треугольник

Схема изображена на рис. 6-9. Она выполняется при помощи двух однофазных трансформаторов напряжения, включенных на два междофазных напряжения, например U_{AB} и U_{BC} .

Напряжение на зажимах вторичных обмоток трансформаторов напряжения пропорционально междофазным напряжениям, подведенным с первичной стороны. Между проводами вторичной цепи включаются реле. Схема позволяет получать три междофазных напряжения: U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} .

Рассмотренная схема на первичной и вторичной сторонах является схемой незавершенного треугольника (не имеющего одной стороны), что и определило ее название.

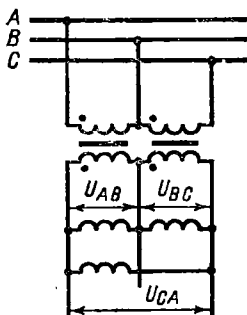


Рис. 6-9. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в открытый треугольник.

в) Схема соединения обмоток однофазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности

Схема выполняется посредством трех однофазных трансформаторов напряжения, как показано на рис. 6-10. Первичные обмотки соединены в звезду с заземленной нейтралью, а вторичные соединяются по-

следовательно, образуя незамкнутый треугольник. К зажимам разомкнутой вершины треугольника подсоединяются реле. Как следует из схемы, напряжение U_p на зажимах разомкнутого треугольника равно геометрической сумме напряжений

вторичных обмоток:

$$\dot{U}_p = \dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c.$$

Выражая вторичные напряжения через первичные, получаем:

$$\dot{U}_p = \frac{\dot{U}_A}{n_H} + \frac{\dot{U}_B}{n_H} + \frac{\dot{U}_C}{n_H}.$$

Так как сумма трех фазных напряжений равна утроенному напряжению нулевой последовательности, то

$$\dot{U}_p = \frac{\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C}{n_H} = \frac{3\dot{U}_0}{n_H}.$$

Следовательно, на зажимах разомкнутого треугольника получается напряжение, пропорциональное напряжению нулевой последовательности.

В нормальных условиях напряжения фаз симметричны и равны в сумме нулю. Поэтому в нормальном режиме $U_p = 0$.

При к. з. без земли сумма фазных напряжений всегда равна нулю, ибо в этом случае векторы напряжений не содержат составляющей нулевой последовательности. Поэтому напряжение U_p и в этом случае также равно нулю. И только при замыканиях на землю геометрическая сумма напряжений фаз относительно земли не равна нулю за счет появления в них составляющей U_0 .

В результате этого на зажимах разомкнутого треугольника появляется остаточное напряжение, равное $U_p = 3U_0/n_H$.

Напряжения прямой и обратной последовательностей образуют симметричные звезды и поэтому при суммировании в цепи разомкнутого треугольника всегда дают нуль на его зажимах.

Таким образом, рассмотренная схема является фильтром, пропускающим только напряжение нулевой последовательности. Рассмотренная схема соединения очень удобна и получила широкое распространение на практике.

Необходимым условием работы рассмотренной схемы в качестве фильтра U_0 является заземление нейтрали первичной обмотки ТН.

При отсутствии заземления к первичным обмоткам ТН будут подводиться вместо фазных напряжений относительно земли фазные напряжения относительно изолированной нейтрали (см. § 6-3, а). Эти напряжения не содержат U_0 , и их сумма всегда равна нулю. Поэтому при замыканиях на землю напряжение на выходе схемы будет отсутствовать.

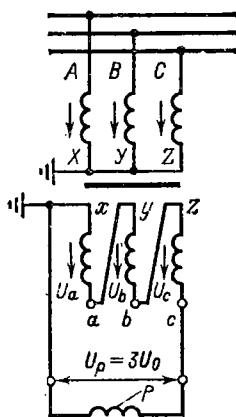
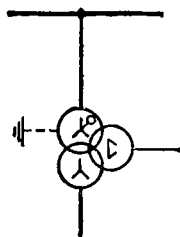


Рис. 6-10. Схема соединений однофазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности.

Применяя однофазные трансформаторы напряжения с двумя вторичными обмотками, можно соединить одну вторичную обмотку по схеме звезды, а вторую — разомкнутым треугольником (рис. 6-11) и получить, таким образом, от одного трансформатора напряжения три вида напряжений: фазные, между-фазные и нулевой последовательности.

Номинальное вторичное напряжение у обмотки, предназначенной для соединения в разомкнутый треугольник, принимается равным для сетей с заземленной нейтралью 100 В и для сетей с изолированной нейтралью $100/\sqrt{3}$ В.



г) Схема соединения обмоток трехфазных трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности

Рис. 6-11. Типовая схема соединений обмоток однофазных трехобмоточных трансформаторов напряжения.

Для получения напряжения нулевой последовательности от трехфазного пятистержневого трансформатора (рис. 6-8) на каждом из его основных стержней 1, 2 и 3 выполняется дополнительная (третья) обмотка, соединяемая, как и в предыдущем случае, по схеме разомкнутого треугольника. Напряжение на выводах этой обмотки появляется, так же как и в предыдущем случае, только при к. з. на землю, когда возникают магнитные потоки нулевой последовательности, замыкающиеся по четвертому и пятому стержням магнитопровода.

Схемы с пятистержневым трансформатором, показанные на рис. 6-8, позволяют получать одновременно с напряжением нулевой последовательности фазные и междуфазные напряжения.

6-4. ПОВРЕЖДЕНИЯ В ЦЕПЯХ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ И КОНТРОЛЬ ЗА ИХ ИСПРАВНОСТЬЮ

а) Повреждения в цепях ТН

Во вторичных цепях трансформатора напряжения могут возникать повреждения (к. з. и обрывы). Короткие замыкания вызывают опасное увеличение тока в трансформаторе, и поэтому для его защиты устанавливаются предохранители или автоматы, прерывающие цепь при появлении повышенных токов. *Повреждения вторичных цепей, а также их нарушение при перегорании предохранителей или действия автоматов искажают величину и фазу вторичного напряжения, что приводит к неправильной работе защиты.*

Так, например, при к. з. или обрыве фаз вторичной цепи напряжение, подводимое к обмоткам реле защиты, снижается или полностью исчезает, что воспринимается защитой как к. з. в сети и может явиться причиной ложного действия защиты.

Для предупреждения ложных действий предусматриваются специальные устройства (блокировки), которые реагируют на повреждения во вторичных цепях напряжения, подают при этом сигнал о неисправности и выводят из действия (блокируют) защиты, которые могут неправильно сработать при повреждении в цепях напряжения.

Выполнение подобных устройств, полноценно реагирующих на все возможные повреждения, является трудной задачей.

б) Блокирующие устройства, реагирующие на появление U_0 и I_0 при повреждениях в цепях напряжения

На рис. 6-12 приведены наиболее распространенные устройства этого типа. Они реагируют на появление напряжения и тока

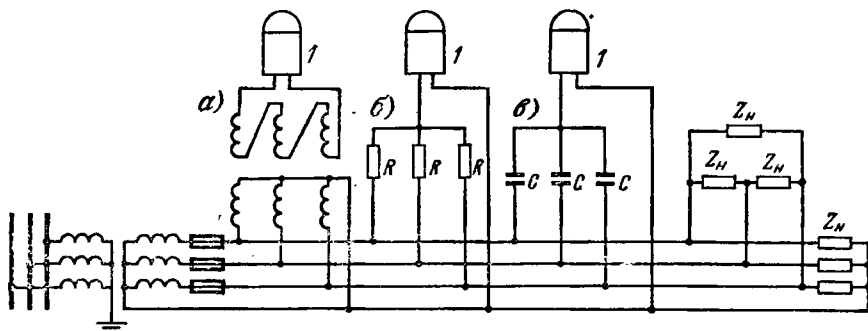


Рис. 6-12. Схемы сигнализации обрыва в цепях трансформатора напряжения.

а — с трансформаторным фильтром U_0 ; б — с фильтром на активных сопротивлениях; в — с фильтром на конденсаторах C .

нулевой последовательности во вторичных цепях трансформатора напряжения. Для этого реле 1 включается на напряжение нулевой последовательности по одной из схем, приведенных на рис. 6-12.

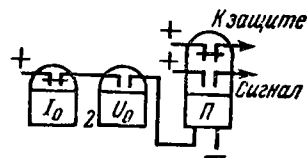


Рис. 6-13. Схема блокировки защиты при обрыве цепей напряжения. Реле 2 (U_0) обозначено на рис. 6-12 цифрой 1.

В нормальных условиях вторичные напряжения трансформатора напряжения симметричны, поэтому их сумма равна нулю и напряжение на реле 1 отсутствует. При обрыве одной или двух фаз цепи напряжения возникает U_0 , под влиянием которого в реле 1 появляется ток и оно срабатывает, давая сигнал и выводя защиту из работы.

Реле 1 может действовать не только при обрывах, но и при к. з. на землю в первичной сети; чтобы предотвратить при этом блокирование защиты, ставится реле I_0 (рис. 6-13), реагирующее на появление тока I_0 в первичной сети. При замыканиях на землю в первичной сети реле I_0

размыкает цепь блокировки своим контактом. В случае же повреждения в цепях напряжения и нормальном состоянии первичной сети реле I_0 не действует и разрешает реле 2 (на рис. 6-12 реле 1) блокировать защиту и подать сигнал о повреждении цепей.

Рассмотренное устройство не реагирует на одновременный обрыв всех трех фаз цепи напряжения, на трехфазное к. з. во вторичных цепях и обрыв нулевого провода той же цепи. Однако вследствие своей простоты оно получило широкое распространение. Чебоксарский электроаппаратный завод выпускает устройства подобного типа: КРБ-11 и КРБ-12.

в) Контроль цепей разомкнутого треугольника ТН

Контроль исправности цепи вторичной обмотки ТН, соединенной по схеме фильтра нулевой последовательности, производится путем периодического измерения напряжения небаланса с помощью вольтметра, включаемого по схеме на рис. 6-14. При исправной цепи вольтметр показывает напряжение небаланса, имеющее величину 1—3 В, а при нарушении цепи показания пропадают.

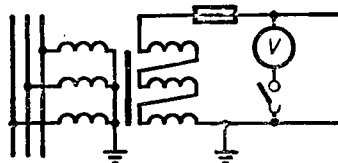


Рис. 6-14. Периодический контроль исправности цепи обмотки, соединенной в фильтр нулевой последовательности.

г) Блокирующее устройство на сравнении напряжений двух вторичных обмоток ТН

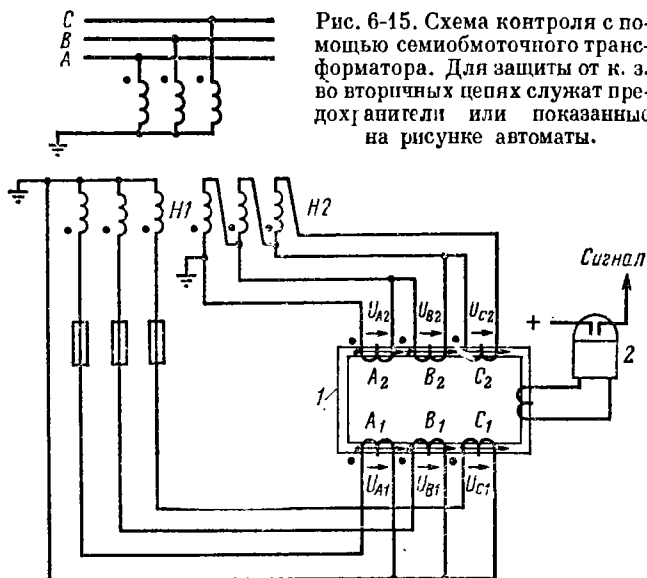
Схема с семинобмоточным трансформатором. Более полноценным по сравнению с предыдущими является устройство контроля, показанное на рис. 6-15. Оно предназначено для трансформаторов напряжения с двумя вторичными обмотками $H1$ и $H2$, соединенными по схеме звезды и разомкнутого треугольника. Действие этого устройства основано на сравнении одноименных фазных напряжений обмоток $H1$ и $H2$, которые нормально одинаковы по величине и фазе.

В случае же неисправности во вторичной цепи одной из обмоток равенство напряжений нарушается, что и служит признаком повреждения, на которое реагирует устройство. Сравнение напряжений обмоток $H1$ и $H2$ производится с помощью многообмоточного вспомогательного трансформатора I (рис. 6-15). Его обмотки A_1 и A_2 , B_1 и B_2 , C_1 и C_2 , питаемые напряжением одноименных фаз, имеют попарно равное число витков и создают встречно направленные магнитные потоки. Витки обмоток, питающихся от разных фаз, неодинаковы и подобраны в определенном соотношении:

$$w_{A1} = w_{A2} = w; \quad w_{B1} = w_{B2} = \frac{2}{3} w; \quad w_{C1} = w_{C2} = \frac{1}{3} w.$$

В нормальных условиях напряжения одноименных фаз контролируемых обмоток $H1$ и $H2$ одинаковы, поэтому создаваемые ими магнитные потоки в трансформаторе 1 взаимно уравновешиваются и ток в реле 2 отсутствует.

В случае обрыва одной или двух фаз в цепях обмотки $H1$ или $H2$ равновесие магнитных потоков соответствующих одноименных фаз обмоток трансформатора 1 нарушается, появляется остаточный поток, вызывающий ток в реле 2 , под влиянием которого оно срабатывает.



При одновременном обрыве трех фаз вторичной цепи обмотки $H1$ или $H2$ сумма потоков в трансформаторе 1 , обусловленных напряжениями, например U_{A1} , U_{B1} и U_{C1} оставшейся обмотки $H1$, не будет уравновешиваться вследствие неравенства витков w_{A1} , w_{B1} , w_{C1} , что и вызовет работу реле 2 .

При к. з. в цепях обмотки $H1$ или $H2$ баланс напряжений нарушается, но, как показывают анализ и испытания, в ряде случаев разница напряжений оказывается недостаточной, в результате чего реле 2 не действует.

На повреждения в первичной сети устройство не отзывается, поскольку при этом вторичные напряжения одноименных фаз обеих обмоток $H1$ и $H2$ равны.

Как отмечалось, обе схемы (по рис. 6-12 и 6-15) из-за недостаточной чувствительности не отзываются на некоторые случаи к. з. во вторичных цепях напряжения.

В этих случаях обе блокировки приходят в действие, но только после работы автоматов, установленных во вторичных цепях трансформаторов напряжения для защиты их от к. з. Контакты автоматов замыкают поврежденную цепь напряжения, после чего блокирующее устройство реагирует на появившийся обрыв цепи и срабатывает. Таким образом, блокировка в этих случаях работает с замедлением.

Для предотвращения неправильной работы защиты, приходящей в действие от понижения напряжения, обусловленного к. з. в цепях напряжения, необходимо выполнить условие

$$(t_a + t_b) < t_3, \quad (6-5)$$

где t_a , t_b и t_3 — время срабатывания автомата, блокировки и защиты соответственно.

При быстродействующих защитах условие (6-5) не всегда выполнимо.

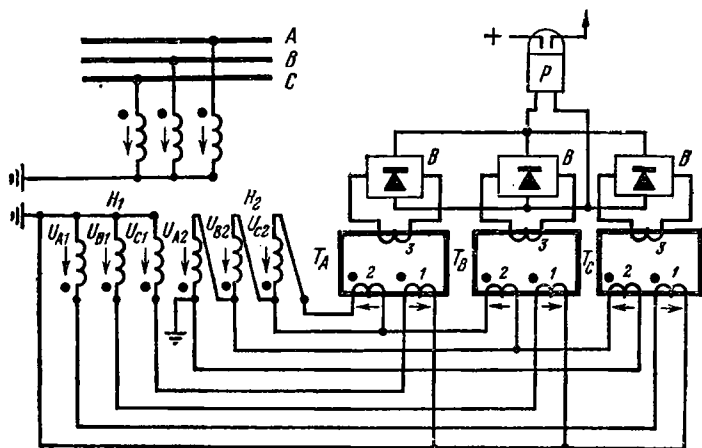


Рис. 6-16. Схема контроля исправности цепей напряжения с помощью трех однофазных трехобмоточных трансформаторов.

В связи с этим разработан новый вариант блокировки защит при нарушениях в цепях напряжения [Л. 92].

Схема с тремя однофазными трансформаторами. Принцип действия этой блокировки также основан на сравнении напряжений одноименных фаз обмоток $TН$, соединенных в звезду и треугольник ($\dot{U}_{A1}$ и $\dot{U}_{A2}$, $\dot{U}_{B1}$ и $\dot{U}_{B2}$, $\dot{U}_{C1}$ и $\dot{U}_{C2}$). Но в отличие от схемы на рис. 6-15 сравнение происходит с помощью трех трансформаторов T_A , T_B и T_C (рис. 6-16). Каждый трансформатор имеет две первичные обмотки (1 и 2), одна включена на фазу звезды, а другая на одноименную фазу треугольника. Намагничивающие силы этих обмоток действуют встречно и в нормальных условиях взаимно уравновешиваются.

Вторичные обмотки 3 каждого трансформатора питают через выпрямители B реле P . При обрыве или к. з. в цепях, питающих первичные обмотки 1 или 2 T_A , T_B или T_C , баланс н. с. соответствующего трансформатора нарушается, в его вторичной обмотке появляется ток, который выпрямляется и поступает в реле

P , вызывая его действие. Рассмотренная схема обладает высокой чувствительностью и реагирует на все виды повреждений во вторичных цепях ТН.

д) Оценка схем

Схемы, реагирующие на появление составляющих нулевой последовательности, проще других, но они недостаточно совершенны. Эти схемы не действуют при обрыве трех фаз вторичных цепей ТН, а также при к. з. в цепях напряжения, не сопровождающихся появлением U_0 .

Схемы на балансе напряжений с тремя трехобмоточными трансформаторами более совершенны, но и более сложны. Их следует применять для блокировки защит на линиях 220 кВ и выше, отключение которых из-за ложной работы защиты существенно влияет на надежность энергосистемы.

6-5. ЕМКОСТНЫЕ ДЕЛИТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ

Для питания устройства релейной защиты наряду с трансформаторами напряжения могут также применяться емкостные делители напряжения. Емкостные делители состоят из нескольких последовательно соединенных конденсаторов, включаемых между проводом фазы и землей (рис. 6-17).

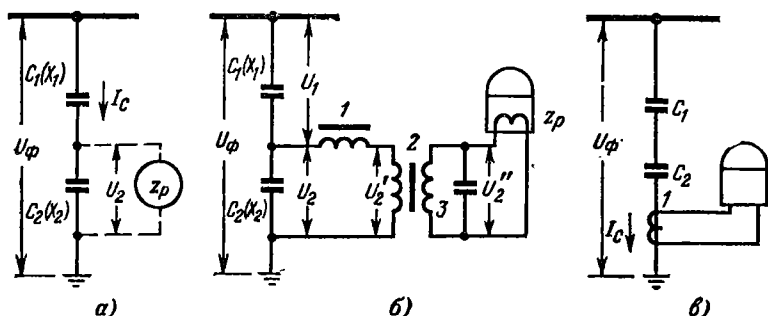


Рис. 6-17. Емкостные делители напряжения.

а и б — с измерением напряжения на конденсаторе C_2 ; в — с измерением зарядного тока, проходящего через конденсаторы C_1 и C_2 .

Имеются два способа использования емкостных делителей для измерения напряжения.

Первый способ (рис. 6-17, а) состоит в том, что для питания защиты используется напряжение U_2 , снимаемое с зажимов последнего конденсатора делителя C_2 .

При отсутствии нагрузки Z_p напряжение U_2 пропорционально первичному напряжению U_ϕ и совпадает с ним по фазе, как это следует из рис. 6-17, а. Действительно,

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_C jx_2 = \frac{U_\phi}{j(x_1 + x_2)} jx_2 = kU_\phi,$$

$$k = \frac{x_2}{x_1 + x_2} = \text{пост.}$$

Величина U_2 достигает нескольких киловольт, поэтому нагрузка подключается к зажимам конденсатора C_2 через понизительный трансформатор напряжения 2 (рис. 6-17, б). Присоединение сопротивления нагрузки z_p искажает как величину, так и фазу U_2 , что и вызывает погрешность измерения. Для уменьшения этой погрешности предусматривается компенсирующее устройство, состоящее из реактора 1 и конденсатора 3.

Соответствующим подбором их параметров и ограничением величины нагрузки z_p можно с достаточной точностью обеспечить пропорциональность и совпадение по фазе напряжения U_2 , подводимого к нагрузке z_p , с измеряемым напряжением U_ϕ .

Во втором способе (рис. 6-17, в) для измерения напряжения используется зарядный ток I_C , проходящий в делителе.

Ток $I_C = \frac{U_\phi}{x_{C1} + x_{C2}}$ н, следовательно, пропорционален первичному напряжению. Ко вторичной обмотке трансформатора тока подсоединяется реле. Ток в реле пропорционален первичному току I_C , а следовательно, и первичному напряжению U_ϕ .

В качестве емкостных делителей для отбора напряжения используются специальные конденсаторные вводы выключателей и силовых трансформаторов (рис. 6-18) или конденсаторы связи, применяемые для подключения к линии электропередачи высокочастотных постов связи и защиты.

Существенным недостатком емкостных делителей является относительно малая мощность и большая, чем у трансформаторов напряжения, погрешность.

Так, например, при отборе напряжения от конденсаторных вводов (выключателей и трансформаторов) удается получить мощность примерно $15 \text{ В} \cdot \text{А}$ на вводах 110 кВ и $35 \text{ В} \cdot \text{А}$ — на вводах 220 кВ при погрешности по величине напряжения около $\pm 6\%$, и по углу $\pm 1^\circ$.

В случае использования конденсаторов связи удается получить мощность примерно $100\text{--}120 \text{ В} \cdot \text{А}$ (на напряжении 220 кВ) при погрешности измерения, соответствующей первому классу точности трансформаторов напряжения. Отечественные заводы выпускают с использованием конденсаторов связи измерительные устройства типа НДЕ-500 для сетей 500 кВ .

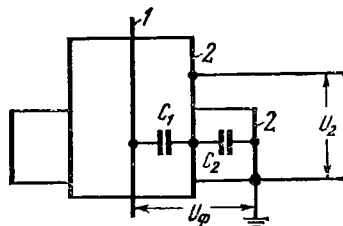


Рис. 6-18. Отбор напряжения от конденсаторного ввода выключателя.

1 — токоведущая часть ввода;
2 — обкладка из фольги.

6-6. ФИЛЬТР НАПЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Фильтр напряжения обратной последовательности является устройством (рис. 6-19), при помощи которого можно получить напряжение U_{mn} , пропорциональное составляющей обратной

последовательности, содержащейся в напряжении сети:

$$\dot{U}_{mn} = k\dot{U}_{2\text{сети}}.$$

Составляющие прямой и нулевой последовательностей такой фильтр не пропускают. Поэтому реле, подсоединенное к выходным зажимам фильтра, реагирует только на U_2 .

Для упрощения конструкции фильтр обычно включается на линейные напряжения, которые не содержат нулевой последовательности.

Наибольшее распространение получили фильтры, состоящие из активных и реактивных сопротивлений, образующих два «плеча» A и C (рис. 6-19), питающихся напряжениями U_{AB} и U_{BC} .

Сопротивления плеч фильтра (z_{A1} , z_{A2} и z_{C1} , z_{C2}) подбираются с таким расчетом, чтобы при подводе к фильтру напряжений прямой последовательности напряжение на его выходных зажимах было равно нулю:

$$U_{mn1} = 0. \quad (6-5a)$$

Рассматривая контур mBn (рис. 6-19), легко убедиться, что для выполнения условия (6-5a) напряжение U'_A должно компенсировать напряжение U'_C или, иначе говоря,

$$\dot{U}'_A = -\dot{U}'_C. \quad (6-6)$$

Существует большое число сочетаний сопротивлений, образующих фильтр, удовлетворяющий условиям (6-5a) и (6-6).

В схемах защиты, распространенных в СССР, чаще всего используются фильтры с активным и емкостным сопротивлениями (рис. 6-20, а).

Анализ работы фильтра и выбор его параметров ведутся с помощью векторных диаграмм при разомкнутой выходной цепи фильтра.

Векторы падения напряжения в активном и емкостном сопротивлениях каждого плеча сдвинуты на 90° и равны в сумме напряжению, питающему данное плечо, т. е.

$$\dot{U}_{Ar} + \dot{U}_{Ax} = \dot{U}_{AB} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{Cr} + \dot{U}_{Cx} = \dot{U}_{BC}.$$

Таким образом, напряжения каждого плеча образуют прямоугольный треугольник (рис. 6-20, б).

Векторная диаграмма фильтра при питании его напряжением прямой последовательности построена на рис. 6-21.

Показав векторы напряжений между зажимами 1, 2 и 2, 3, строят падения напряжения в плечах (между 1 и 2, 2 и 3) так,

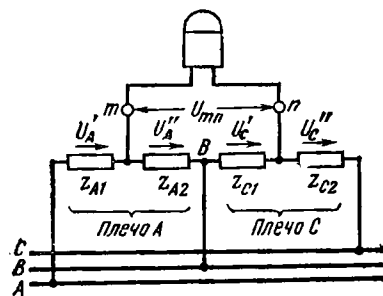


Рис. 6-19. Принципиальная схема фильтра напряжения обратной последовательности.

чтобы выполнялись условия (6-5а) и (6-6), для чего точки m и n должны совпадать, как это показано на диаграмме рис. 6-21. Из полученных при этом треугольников напряжений плеч A и C следует:

$$\frac{U_{Ar1}}{U_{Ax1}} = \frac{\sqrt{3}}{\frac{2}{1}} = \sqrt{3} \quad \text{и} \quad \frac{U_{Cx1}}{U_{Cx1}} = \frac{\sqrt{3}}{\frac{2}{1}} = \sqrt{3}. \quad (6-7)$$

Учитывая, что при разомкнутых зажимах mn напряжения пропорциональны сопротивлениям, находим соотношения сопро-

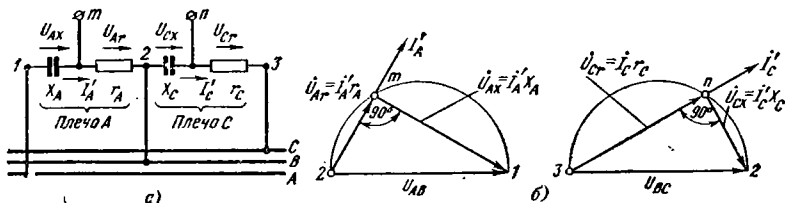


Рис. 6-20. Активно-емкостный фильтр напряжения обратной последовательности.

а — схема; б — векторные диаграммы напряжений в плечах A и C .

тивлений соответствующих плеч, необходимые для выполнения условия (6-5а), а именно:

$$r_A = \sqrt{3} x_A \quad \text{и} \quad x_C = \sqrt{3} r_C.$$

Теперь посмотрим, что получится на выходе фильтра с выбранными параметрами, если к его зажимам 1, 2 и 3 подвести

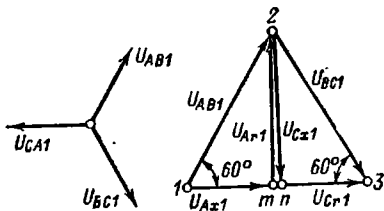


Рис. 6-21. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения прямой последовательности.

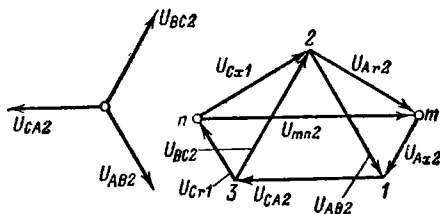


Рис. 6-22. Векторная диаграмма фильтра при подводе напряжения обратной последовательности.

напряжения обратной последовательности $\dot{U}_{AB2}$ и $\dot{U}_{BC2}$. Для этого строится векторная диаграмма фильтра (рис. 6-22). На ней показываются векторы напряжений $\dot{U}_{AB2}$ и $\dot{U}_{BC2}$ между зажимами 1, 2 и 3 и векторы падений напряжения в активных и реактивных сопротивлениях плеч. На основе этого построения находятся точки, соответствующие зажимам m и n . Вектор напряжения

$\dot{U}_{mn2}$ является напряжением на выходе фильтра, появляющимся при питании фильтра напряжением обратной последовательности:

$$\dot{U}_{mn2} = 1,5 \dot{U}_{CA2} = 1,5 \sqrt{3} \dot{U}_{\phi 2} e^{j30} = k \dot{U}_{\phi 2}, \quad (6-8)$$

где $\dot{U}_{\phi 2} = \dot{U}_{CA2} / \sqrt{3}$ — составляющая обратной последовательности фазного напряжения. Это означает, что фильтр, изображенный на рис. 6-20, действительно является фильтром обратной последовательности.

Сопротивление подключаемого к фильтру реле z_p подбирается с расчетом, чтобы отдаваемая фильтром мощность была максимальной. Для выполнения этого z_p должно равняться сопротивлению фильтра $z_{\phi. x. x}$ в режиме, когда его выходные зажимы разомкнуты:

$$z_p = z_{\phi. x. x}.$$

Оптимальные условия отдачи мощности имеют место, когда реактивные сопротивления фильтра и реле равны, но различны по знаку [см. § 3-8, уравнение (3-22)].

При трехфазных к. з. и в режиме симметричной нагрузки напряжение, питающее фильтры, содержит только составляющую прямой последовательности, и поэтому напряжение на выходе фильтра в этих случаях равно нулю или, точнее, напряжению небаланса.

Напряжение небаланса возникает из-за неточности подбора сопротивлений плеч, а также из-за наличия некоторой несимметрии напряжения, питающего фильтр, и при отклонении частоты этого напряжения от номинального значения 50 Гц. В последнем случае изменится сопротивление конденсаторов x_C и произойдет нарушение заданных соотношений между x_C и r , включенных в плечи фильтра.

Если в рассмотренном фильтре переставить местами напряжения U_C и U_B , то при питании фильтра напряжением обратной последовательности выходное напряжение U_{mn} будет равно нулю, а при питании его напряжением прямой последовательности на зажимах появится напряжение, пропорциональное U_1 . Таким образом, рассмотренная схема превратится в фильтр прямой последовательности. Этот вывод нетрудно подтвердить, построив векторные диаграммы фильтра для указанных случаев.

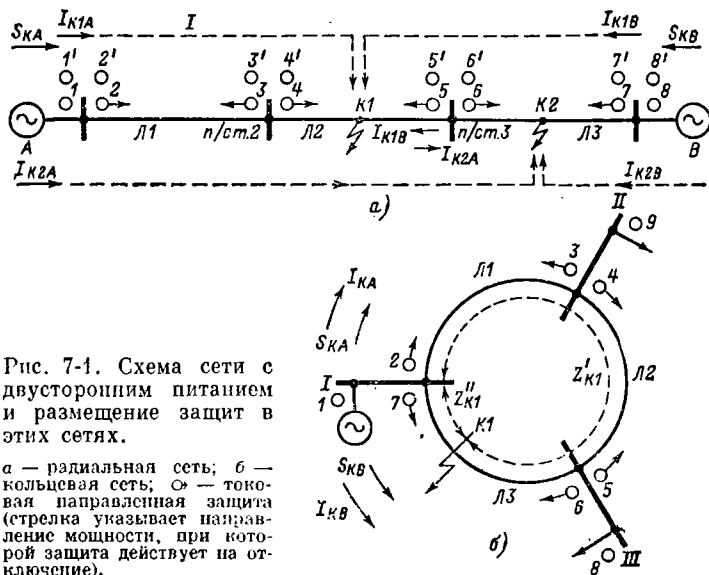
ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

7-1. НЕОБХОДИМОСТЬ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ В СЕТЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

Направленной называется защита, действующая только при определенном направлении (знаке) мощности к. з. Необходимость в применении направленных защит возникает в сетях с двусторонним питанием. Защита в этих сетях должна

не только реагировать на появление тока к. з., но для обеспечения селективности должна также учитывать направление мощности к. з. в защищаемой линии (или, иначе говоря, фазу тока в линии относительно напряжения на шинах).



В сетях с двусторонним питанием (рис. 7-1, а) и кольцевых сетях (рис. 7-1, б) направление тока и мощности к. з. зависит от места возникновения повреждения и может иметь два противоположных значения. Например, как следует из рис. 7-1, а, при к. з. на линии Л2 в точке К1 через защиту 5 проходит ток I_{K1B} от источника питания В к точке к. з.

При к. з. в точке К2 на линии Л3 ток I_{K2A} , проходящий по линии Л2 через защиту 5, направлен от источника А и противоположен I_{K1B} .

Если принять, что в первом случае I_{K1} (рис. 7-2) отстает от напряжения $U_{ш}$ на шинах подстанции 3 на угол φ_{K1} , а мощность к. з. (активная P и реактивная Q) положительна и направлена от шин в линию, то во втором случае ток I_{K2} сдвинут на 180° относительно I_{K1} , а соответствующая этому мощность к. з. (как

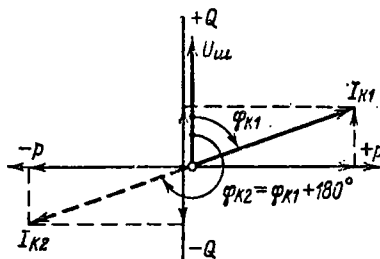


Рис. 7-2. Векторная диаграмма токов и напряжения в месте установки защиты 5 (рис. 7-1, а) при к. з. в точках К1 и К2.

это видно из рис. 7-2) отрицательна и поэтому направлена из линии к шинам. Таким образом, направление мощности к з., проходящей по линии, характеризует, где возникло повреждение: на защищаемой линии или на других присоединениях, отходящих от шин данной подстанции.

Это обстоятельство используется в направленной защите, которая по знаку мощности определяет, на каком присоединении возникло повреждение, и действует только при к. з. на защищаемом участке.

Простая токовая защита, не реагирующая на знак мощности, действует как при к. з. на защищаемой линии, так и при повреждениях на других присоединениях, отходящих от шин подстанции, питающей защищаемую линию. Поэтому получить селективное отключение к. з. в сетях с двусторонним питанием с помощью простой токовой защиты, как правило, невозможно.

Действительно, предположим, что в сети на рис. 7-1, а установлены максимальные токовые защиты, и рассмотрим действие какой-либо из них, например защиты 5'. При к. з. в точке K1 выдержка времени защиты 5' должна быть меньше времени действия защит 6', 7' и 8', т. е. $t_5' > t_6'$, t_7' и t_8' . В случае же к. з. в точке K2 защита 5' должна действовать медленнее защиты 6' ($t_5' > t_6'$). Одновременное выполнение обоих требований невозможно. Выполнение же только одного из двух требований приведет к неселективной работе защиты.

Так, при выполнении первого требования (т. е. при $t_5' < t_6'$, $t_5' < t_7'$, $t_5' < t_8'$) максимальная защита 5' будет действовать неселективно при к. з. на линии ЛЗ.

Эту неселективность можно устранить, заменив максимальную защиту 5' направленной защитой 5, действующей только при направлении мощности к. з. от шин в линию. В этом случае защита 5 не будет действовать при к. з. на ЛЗ и поэтому второе требование ($t_5 > t_8$) отпадает. При аналогичном выполнении всех остальных защит сети селективное отключение повреждений становится возможным при выборе выдержек времени защит, действующих в одном направлении, по ступенчатому принципу.

На основании изложенного можно сформулировать следующие принципы выполнения селективной защиты в сетях с двусторонним питанием:

1. Защита должна устанавливаться с обеих сторон каждой линии и действовать при направлении мощности от шин в линию.

2. Выдержки времени на защитах, работающих при одном направлении мощности (от генератора А или генератора В), должны согласовываться между собой по ступенчатому принципу, нарастая по направлению к источнику питания, от тока которого действуют рассматриваемые защиты (см. § 7-6).

7-2. СХЕМА И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ

Максимальная направленная защита должна реагировать на величину тока и направление мощности при к. з. Она представляет собой максимальную токовую защиту, дополненную реле направления мощности. Схема защиты, упрощенно показанная для одной фазы (рис. 7-3), состоит из трех основных элементов (называемых иногда органами защиты): токового реле 1, реагирующего на появление к. з. (пусковой орган защиты); реле направления мощности 2, определяющего направление мощности к. з. (орган направления), и реле времени 3 (орган времени).

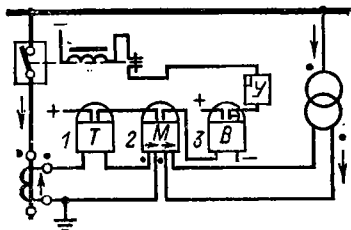


Рис. 7-3. Упрощенная схема максимальной направленной защиты (стрелки указывают положительные направления токов).

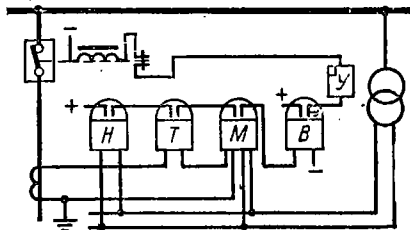


Рис. 7-4. Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения.

В качестве реле направления мощности могут служить электро-механические реле (§ 2-12) или реле на полупроводниках (§ 2-14, б). Поведение этих реле зависит от знака подведенной к их зажимам мощности:

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p), \quad (7-1)$$

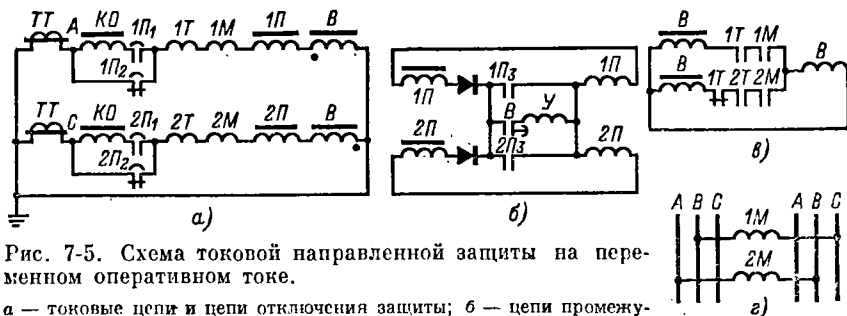
где угол α имеет постоянную величину, равную 0, 90° или α_1 ($90^\circ > \alpha_1 > 0$).

При к. з. на защищаемой линии или на следующих за ней участках токовые реле и реле направления мощности замыкают свои контакты и приводят в действие реле времени. Через установленную выдержку времени его контакты замыкаются, подавая импульс на отключение выключателя. При к. з. на других присоединениях, отходящих от данной подстанции, мощность к. з. направлена к шинам, поэтому контакты реле мощности размыкаются, не позволяя защите действовать на отключение.

В нормальном режиме при направлении мощности нагрузки от шин в линию реле направления мощности могут замыкать свои контакты, однако срабатывание защиты в этом случае предотвращается пусковым реле T , контакты которого остаются разомкнутыми. С этой целью пусковые реле отстраиваются

от тока нагрузки. В тех случаях, когда по условию чувствительности при к. з. токовые реле не удастся отстроить от максимальной нагрузки, применяется блокировка (пуск защиты) от реле минимального напряжения (H). Упрощенная схема максимальной направленной защиты с блокировкой минимального напряжения, приведенная на рис. 7-4, аналогична рассмотренной в § 4-6 схеме максимальной токовой защиты.

В сетях с изолированной нейтралью максимальная направленная защита устанавливается на двух одноименных фазах во всей сети. В сетях с глухозаземленной нейтралью защита устанавливается на трех фазах, если же защита служит для действия только



при междуфазных повреждениях, то она устанавливается на двух фазах.

Токовые направленные защиты выполняются как на постоянном, так и на переменном оперативном токе. Двухфазная схема на переменном оперативном токе представлена на рис. 7-5.

Она выполнена с дешунтированием катушки отключения, с токовым реле времени B и промежуточными реле 1Π и 2Π с мощными переключающими контактами.

При нарушении цепей напряжения одной или двух фаз, питающих реле направления мощности, защита может при к. з. подействовать неправильно. Поэтому для своевременного выявления повреждения цепей напряжения необходимо иметь устройства, контролирующие их исправность (см. § 6-4).

7-3. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

а) Требования к схемам

Реле направления мощности включаются, как правило, на фазный ток и фазное или междуфазное напряжение. Сочетание фаз тока и напряжения питающих реле, называемое схемой его включения, должно быть таким, чтобы реле правильно определяло знак мощности к. з. при всех возможных случаях и видах

90-градусная схема включения			30-градусная схема включения		
Реле	I_p	U_p	Реле	I_p	U_p
I	I_A	U_{BC}	I	I_A	U_{AC}
II	I_B	U_{CA}	II	I_B	U_{BA}
III	I_C	U_{AB}	III	I_C	U_{CB}

повреждений и чтобы к нему подводилась наибольшая мощность S_p .

Мощность S_p , как это следует из формулы (7-1), может иметь недостаточную для действия реле величину при к. з., близких к месту установки реле, за счет снижения напряжения U_p или

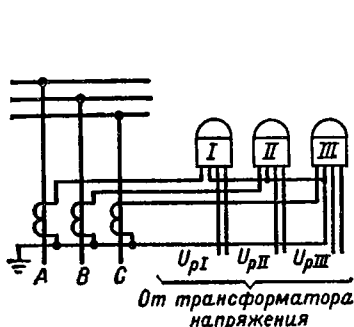


Рис. 7-6. Схема включения реле направления мощности.

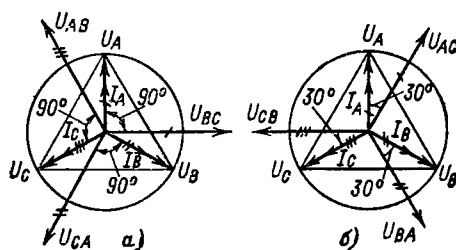


Рис. 7-7. Векторные диаграммы токов и напряжений, подводимых к реле направления мощности.

а — при 90-градусной схеме; б — при 30-градусной схеме.

при неблагоприятном значении угла φ_p , при котором $\sin(\alpha - \varphi_p)$ равен или близок к нулю. Отсюда следует, что, в о - п е р в ы х, реле должно включаться на такое напряжение, которое при близких к. з. не снижается до нуля, и, в о - в т о р ы х, напряжение и ток, подводимые к реле, должны подбираться так, чтобы угол сдвига между ними φ_p в условиях к. з. не достигал значений, при которых мощность на контактах реле приближается к нулю.

Следует отметить, что первое требование выполняемо только при двухфазных и однофазных к. з., в случае же трехфазного к. з. все фазные и междуфазные напряжения могут снижаться до нуля.

В современных схемах максимальных направленных защит применяется включение реле направления мощности по так называемым 90-градусной и иногда 30-градусной схемам. Соответствующие указанным схемам сочетания токов и напряжений приведены в табл. 7-1 применительно к схеме включения реле на рис. 7-6.

Названия схем 90-градусная, 30-градусная и т. п. носят условный характер. Схемы именуются по углам φ_p между током и напряжением, подведенными к реле в симметричном трехфазном режиме при условии, что токи в фазах совпадают с одноименными фазными напряжениями (рис. 7-7). Свойства каждой схемы могут быть выявлены анализом работы реле мощности, включенного по той или иной схеме, при к. з.

б) 90-градусная схема

В качестве примера ниже рассмотрена работа реле направления мощности типа РБМ-171 с углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$, включенного по 90-градусной схеме. Угол внутреннего сдвига этого реле $\alpha = 90^\circ + \varphi_{м.ч} = 90 - 30 = 60^\circ$ (см. § 2-12, 6).

Момент такого реле $M = k U_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$.

Анализ ведется графическим методом для реле, включенного на ток $I_p = I_A$ и напряжение $U_p = U_{BC}$.

На рис. 7-8 изображена векторная диаграмма напряжений и ток I_A при трехфазном к. з. на линии. Ток I_A отстает от напряжения U_A на угол φ_k , определяемый соотношением активного и реактивного сопротивления линии от шин до точки к. з. и влиянием активного сопротивления дуги, возникающей

Рис. 7-8. Векторная диаграмма напряжений и тока фазы А при трехфазном к. з. на линии.

в месте повреждения. Соответственно этому вектор I_A имеет два предельных положения. Одно I'_A — при к. з. за чистореактивным сопротивлением, когда $\varphi_k = 90^\circ$, и второе I''_A — при к. з. через дугу в начале линии, когда $\varphi_k = 0$.

На основе полученной векторной диаграммы можно установить, что угол сдвига между напряжением и током на зажимах реле, т. е. между U_{BC} и I_A , $\varphi_p = -(90^\circ - \varphi_k)$, а его предельные значения колеблются в зависимости от φ_k от 0 до 90° .

По найденным значениям φ_p определяются знак и относительная величина момента реле. С этой целью строится диаграмма тока и напряжения на зажимах реле для рассмотренных случаев к. з. (рис. 7-9). На ней относительно вектора напряжения U_p напосится линия изменения знака момента $N_1 N_2$ и линия максимального момента $M_1 M_2$ для данного типа реле. Проекция тока I_A на линию максимального момента, равная $I_A \sin(\alpha - \varphi_p)$, наглядно характеризует величину и знак момента.

При к. з. в зоне проекция тока I_A имеет положительный знак, а в случае к. з. вне зоны — отрицательный, так как при этом фаза тока I_A меняется

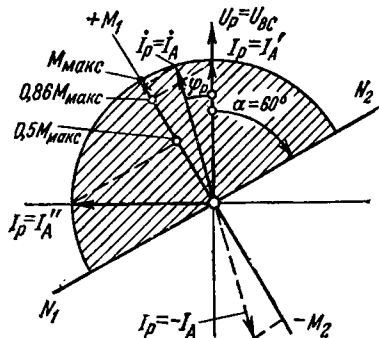
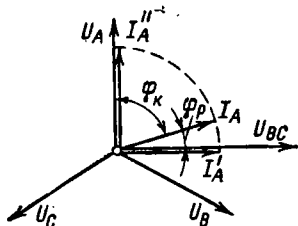


Рис. 7-9. Векторная диаграмма токов и напряжений на зажимах реле и линии моментов реле направления мощности $M_{вр} = k U_p I_p \sin(60^\circ - \varphi_p)$. Зона положительных моментов заштрихована.

на 180° . Величина момента достигает своего максимума $M_{\max}$ при $\varphi_p = -30^\circ$ (чему соответствует $\varphi_k = 60^\circ$). При изменении φ_p в сторону уменьшения от -30 до 0° момент снижается от $M_{\max}$ до $0,86 M_{\max}$, а при увеличении φ_p до -90° момент уменьшается до $0,5 M_{\max}$.

Из приведенных результатов следует, что поведение реле при трехфазных к. з. в зоне и вне зоны будет правильным и величина момента вполне достаточной для действия реле.

Указанные выводы могут быть получены и аналитическим путем из рассмотрения значений $\sin(\alpha - \varphi_p)$ при указанных выше величинах φ_p .

С точки зрения величины U_p при трехфазных к. з. схема обеспечивает максимально возможное значение напряжения на зажимах реле, поскольку реле питается линейным, а не фазным напряжением, но при к. з. у шин подстанции $U_p = 0$.

Построив аналогичным образом диаграммы для токов и напряжений при однофазных и двухфазных к. з. и определив предельные значения φ_k и φ_p , можно проанализировать работу реле при данной схеме включения и для этих видов повреждений.

Подобным анализом можно выяснить наиболее выгодные углы внутреннего сдвига реле α . Так, если положить $\alpha = 90^\circ$, то рассматриваемое реле станет косинусным. При включении его по 90-градусной схеме линия изменения знака момента $N_1 N_2$ расположится перпендикулярно вектору $U_p = U_{BC}$, а линия максимальных моментов будет совпадать с U_p (рис. 7-10). Из диаграммы на рис. 7-10 видно, что при $\varphi_k = 0$ момент реле равен нулю, поэтому косинусные реле не следует включать по 90-градусной схеме.

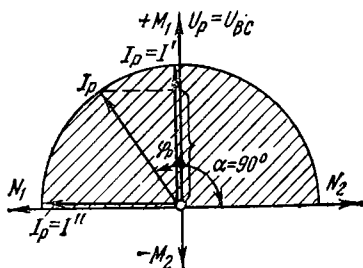


Рис. 7-10. Линия моментов реле направления мощности $M_{вр} = U_p I_p \cos \varphi_p$. Зона положительных моментов заштрихована.

Исследования показывают, что 90-градусная схема оказывается наиболее выгодной для реле направления мощности с углом α от 30 до 60° . Оптимальные условия имеют место при $\alpha = 45^\circ$.

Теоретический анализ и практический опыт позволяют сделать следующие общие выводы о включении реле смешанного типа $\varphi_{м.ч} = -30^\circ$ и -45° по 90-градусной схеме:

- 1) Знак момента реле при всех видах к. з. в зоне положителен, а при повреждениях вне зоны — отрицателен.
- 2) Величина момента M_z в диапазоне возможных изменений угла φ_p остается значительной и достаточной для действия реле.
- 3) Напряжение U_p при симметричных к. з. имеет максимально возможное значение, обеспечивающее минимальную величину мертвой зоны.

Недостатком 90-градусной схемы является возможность неправильной работы однофазных реле мощности при к. з. за силовым трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник [Л. 23]. В случае двухфазного к. з. на стороне звезды через электрическую дугу с большим сопротивлением может неправильно выбрать направление мощности одно из реле, установленных со стороны треугольника. Трехфазные реле мощности в подобных случаях действуют правильно. Однако сочетания опасных

условий настолько редки, что в практике эксплуатации указанный недостаток не проявляется. Поэтому 90-градусная схема в настоящее время считается лучшей и рекомендуется как типовая для реле направления мощности смешанного типа.

Тридцатиградусная схема включения может использоваться для реле ко синусного типа. Реле, включенные по этой схеме, дедут себя правильно при всех видах к. з. Недостатком 30-градусной двухфазной схемы является возможность отказа в действии реле при двухфазных к. з. из-за недостаточной величины напряжения. Ввиду этого для двухфазных защит 30-градусная схема не применяется. Включенные по 30-градусной схеме реле направления мощности могут работать неправильно в случае к. з. за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник с той же степенью вероятности, что и при 90-градусной схеме включения.

7-4. ПОВЕДЕНИЕ РЕЛЕ МОЩНОСТИ, ВКЛЮЧЕННЫХ НА ТОК НЕПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ

а) Токи в неповрежденных фазах

При двухфазных к. з. на линии, питающей нагрузку, в неповрежденной фазе проходит ток нагрузки I_H .

В сетях с глухозаземленной нейтралью при замыканиях на землю (двухфазных и однофазных) в неповрежденных фазах появляется, кроме тока нагрузки I_H , еще некоторая доля тока к. з. I_K .

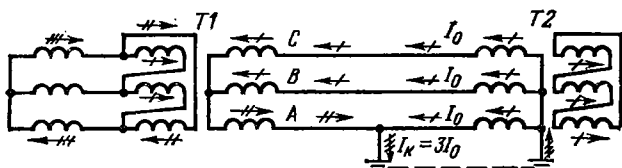


Рис. 7-11. Пути прохождения тока к. з. в сети с заземленной нейтралью.

Ее величина определяется расчетом и равна части тока нулевой последовательности I_0 , возникающего в месте к. з.

Таким образом, при замыканиях на землю полный ток в неповрежденной фазе равен:

$$\dot{I}_{H. \Phi} = \dot{I}_H + k \dot{I}_K, \quad (7-1a)$$

где k — коэффициент, учитывающий долю тока I_K , замыкающегося по неповрежденной фазе ($k < 1$).

На рис. 7-11 на частном примере показана причина появления тока к. з. в неповрежденных фазах при наличии с обеих сторон поврежденной линии силовых трансформаторов с соединением

обмоток Δ/Δ . При однофазном замыкании ток к. з. I_k , замыкаясь через место повреждения и землю, притекает к нулевой точке трансформатора $T2$. Здесь он разветвляется по всем трем фазам трансформатора $T2$ и, замыкаясь через обмотки трансформатора $T1$, возвращается к месту повреждения. В приведенном случае

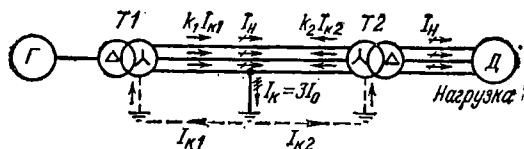


Рис. 7-12. Наложение токов повреждений на токи нагрузки в неповрежденных фазах.

токи к. з., замыкающиеся через неповрежденные фазы B и C , равны $1/3$ тока I_k , проходящего в месте повреждения, поэтому в (7-1 а) коэффициент $k = 1/3$ или $kI_k = I_0$.

При наличии заземленных трансформаторов с обеих сторон линии (рис. 7-12) в неповрежденных фазах появляется ток к. з. kI_k , ответвляющийся в них через нулевые точки трансформаторов $T1$ и $T2$. Этот ток с учетом нагрузки I_n равен $I_{н.ф} = k_1 I_{k1} - k_2 I_{k2} + I_n$.

б) Влияние тока в неповрежденных фазах на реле

Анализ и опыт показывают, что ток нагрузки I_n и составляющая тока повреждения $kI_k = k3I_0$, ответвляющаяся в неповрежденные фазы, могут создать момент на реле, противоположный по знаку моменту реле поврежденных фаз.

Поэтому реле направления мощности, включенные на ток неповрежденных фаз, могут действовать неправильно. Например, если при к. з. на линии $Л2$ (рис. 7-13) направление мощности в фазах линии $Л1$ будет соответствовать показанному на рисунке, то реле направления мощности, установленные на неповрежденных фазах B и C линии $Л1$, замкнут свои контакты и разрешат защите отключить неповрежденную линию.

Трехфазное реле мощности под действием элементов, питающихся током неповрежденных фаз, может также работать неправильно. Результирующий момент этого реле:

$$M_p = M_A + M_B + M_C.$$

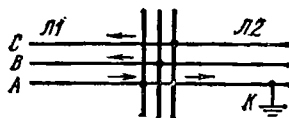


Рис. 7-13. Направление токов в поврежденных и неповрежденных фазах. При к. з. возможно неправильное действие направленной защиты линии $Л1$ под влиянием токов нагрузки.

Если при повреждении на одной фазе A (рис. 7-13) моменты M_B и M_C от токов неповрежденных фаз будут противоположны моменту M_A и превзойдут его в сумме $(M_B + M_C) > M_A$, то реле на линии $Л1$ подействуют неправильно.

в) Пофазный пуск

Неправильное действие реле мощности неповрежденных фаз предотвращается применением пофазного пуска. *Принцип пофазного пуска состоит в том, что пусковые реле разрешают замыкать цепь на отключение только реле мощности, включенным на токи поврежденных фаз.*

В схемах с однофазными реле мощности пофазный пуск принято выполнять подачей оперативного тока к реле мощности от пускового реле, включенного на тот же ток (рис. 7-14).

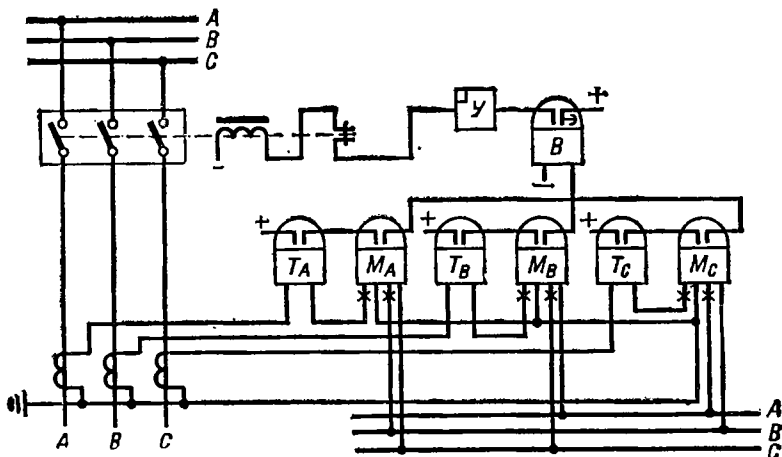


Рис. 7-14. Схема максимальной направленной защиты с пофазным пуском при однофазных реле направления мощности.

В защитах с трехфазными реле мощности пофазный пуск осуществляется подводом напряжения к элементам реле мощности через контакты пусковых реле (рис. 7-15). В момент к. з. пусковое реле, включенное на ток неповрежденной фазы, не действует, поэтому включенный на этот же ток элемент мощности не получает напряжения и не участвует в создании момента на оси реле. Такой способ пофазного пуска может применяться и в схемах с однофазными реле. При пофазном пуске пусковые реле неповрежденных фаз не должны действовать; для этого их ток срабатывания отстраивается от токов, возникающих в неповрежденных фазах при к. з., т. е. $I_{с.р} > I_{н.ф.}$

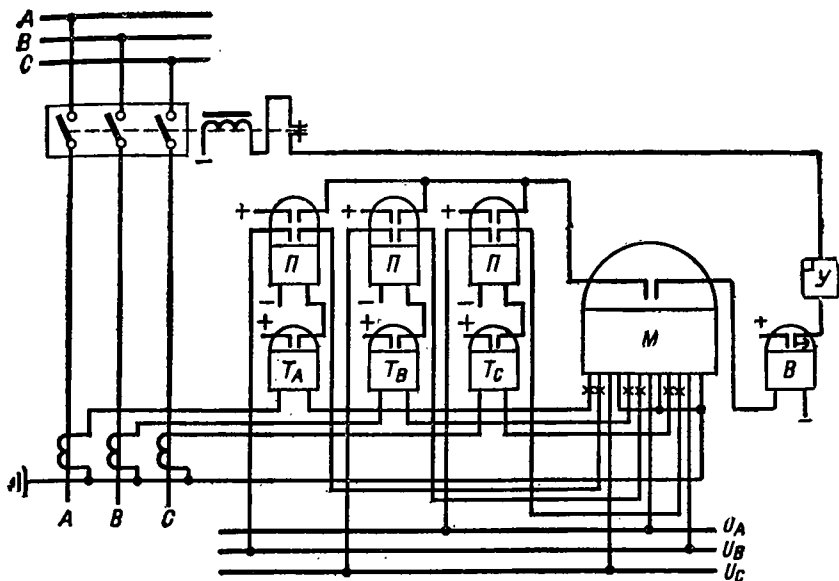


Рис. 7-15. Схема максимальной направленной защиты с пофазным пуском при трехфазном реле направления мощности.

В сети с глухозаземленной нулевой точкой при к. з. на землю ток $I_{н.ф}$ может оказаться значительным за счет большой величины тока повреждения $kI_{н.}$. Это приводит к необходимости загробления защиты.

7-5. БЛОКИРОВКА МАКСИМАЛЬНОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ

Для отключения однофазных к. з. обычно применяются защиты, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности. Поэтому максимальная направленная защита, включаемая на фазные токи, часто используется только в качестве защиты от междуфазных замыканий. В связи с этим при к. з. на землю защита блокируется (т. е. автоматически выводится из действия) посредством токового реле T_0 . Реле T_0 включается в нулевой провод трансформаторов тока, соединенных в звезду, и при замыканиях на землю срабатывает и снимает плюс с защиты, лишая ее возможности действовать на отключение (рис. 7-16).

Пофазный пуск в таких схемах сохраняется для исключения из работы реле мощности неповрежденной фазы при двухфазных к. з. При наличии блокировки при замыканиях на землю ток срабатывания пусковых реле выбирается из условия отстройки

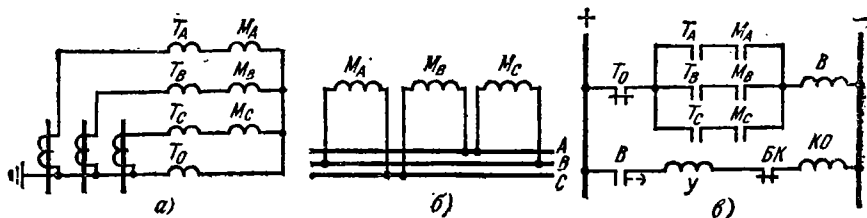


Рис. 7-16. Развернутая схема максимальной направленной защиты с блокировкой при замыкании на землю.

а — цепи тока; б — цепи напряжения; в — цепи постоянного тока; Т — пусковые токовые реле; Т_о — блокирующее токовое реле; М — реле направления мощности; В — реле времени; У — сигнальное реле; КО — отключающая катушка и БК — блокировочный контакт выключателя.

от тока нагрузки I_n , проходящего в неповрежденной фазе во время двухфазных к. з. Необходимость в учете тока повреждения отпадает, благодаря чему повышается чувствительность защиты и упрощается выбор тока срабатывания пусковых реле.

7-6. ВЫБОР УСТАВОК ЗАЩИТЫ

а) Ток срабатывания пусковых реле

Для предотвращения неправильной работы защиты ток срабатывания пусковых реле необходимо отстроить от токов нагрузки с учетом самозапуска двигателей в послеаварийном режиме (т. е. после отключения внешнего к. з.) и от токов повреждения, возникающих в неповрежденных фазах при к. з. на землю в сети с глухозаземленной нейтралью.

Выбор тока срабатывания $I_{с.з}$ по первому условию производится так же, как и для максимальной защиты, на основе соображений, изложенных в § 4-5, по формуле

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_z I_{н. макс}}{k_{воз}}. \quad (7-2)$$

Максимальное значение тока $I_{н. макс}$ следует определять исходя из наиболее тяжелых, но возможных в эксплуатации режимов. В кольцевых сетях и радиальных с двусторонним питанием (рис. 7-1, а и б) максимальные нагрузки на линиях возникают при размыкании сети. Например, в случае отключения линии ЛЗ в сети, показанной на рис. 7-1, б, ток нагрузки на линии Л1 достигает максимального значения.

Для повышения чувствительности защиты в отдельных случаях можно не считаться с максимальной нагрузкой, направленной к шинам подстанции, так как при этом реле мощности не позволяет защите действовать на отключение. Однако при этом нужно

учитывать возможность неправильного действия защиты при нарушении ее цепи напряжения.

В этом случае фазы напряжений, подводимых к защите, искажаются и поэтому реле мощности может замкнуть свои контакты, разрешая подействовать защите при направлении мощности к шинам подстанции.

По второму условию ток срабатывания защиты находится по выражению

$$I_{с.з} = k_n I_{н.ф}, \quad (7-3)$$

где $I_{н.ф} = I_n + kI_n$ (§ 7-4), а коэффициент надежности k_n в зависимости от точности оценки величины $I_{н.ф}$ принимается равным 1,15—1,3.

За окончательное значение $I_{с.з}$ принимается большая величина, полученная по выражениям (7-2) и (7-3).

Для защит в сети с малым током замыкания на землю (где $I_{н.ф} = I_n$) и для защит в сети с глухозаземленной нейтралью, блокируемых при замыканиях на землю, ток срабатывания пусковых реле выбирается только по первому условию, т. е. по формуле (7-2).

Для обеспечения селективности чувствительность защит, действующих в одном направлении, необходимо согласовывать так, чтобы токи срабатывания нарастали при обходе защит против направления их действия.

Такое согласование предотвращает неселективную работу защиты при токах к. з., близких по своему значению к токам срабатывания защит. Сказанное иллюстрируется рис. 7-1, б. При к. з. вблизи питающих шин в точке KI соотношение токов к. з. I_{KA} и I_{KB} обратно пропорционально сопротивлениям z'_{K1} и z''_{K1} , т. е.

$$\frac{I_{KA}}{I_{KB}} = \frac{z''_{K1}}{z'_{K1}}.$$

Чем ближе точка KI к шинам питающей подстанции, тем меньше ток I_{KA} .

Если ток I_{KA} окажется меньше $I_{с.зб}$ защиты 6, то последняя не будет действовать до тех пор, пока линия не отключится со стороны питающей подстанции защитой 7. После этого ток I_{KA} возрастет и защита 6 придет в действие. Такое поочередное отключение линий сначала с одного, а потом с другого конца называется каскадным.

В случае несогласованности защит по чувствительности, например, если защита 4 чувствительнее защиты 6, а ток к. з. $I_{KA} < I_{с.зб}$, но больше $I_{с.з4}$, защита 4 сработает неселективно раньше, чем произойдет отключение линии ЛЗ со стороны питающей подстанции, и подстанция III лишится напряжения.

Таким образом, в показанной на рис. 7-1, б сети токи срабатывания защит должны удовлетворять условию

$$I_{с.зб} < I_{с.з4} < I_{с.з2} < I_{с.з1}, \quad (7-4)$$

а для защит, действующих при обратном направлении мощности,

$$I_{с.33} < I_{с.35} < I_{с.37} < I_{с.31}. \quad (7-5)$$

Разница в величине тока срабатывания двух смежных защит обычно принимается около 10%.

В схемах с блокировкой по напряжению напряжение срабатывания реле минимального напряжения выбирается по (4-15).

Чувствительность пусковых токовых реле при к. з. проверяется, так же как и чувствительность максимальной защиты, по (4-6).

б) Выдержка времени защиты

Выдержка времени выбирается из условия селективности. Для этой цели согласуются выдержки времени защит, действующих в одном и том же направлении, которые по этому признаку

делятся на две группы (рис. 7-17):

1) защиты A_1, A_3, A_5 и A_7 , действующие при направлении мощности к. з. по стрелке А (от источника А);

2) защиты B_2, B_4, B_6 и B_8 , действующие при обратном направлении мощности к. з. (от источника В).

Выдержки времени каждой группы должны

выбираться по ступенчатому принципу. В соответствии с этим необходимо обеспечить: $t_{A7} < t_{A5} < t_{A3} < t_{A1}$ и

$$t_{B2} < t_{B4} < t_{B6} < t_{B8}.$$

Обозначая через Δt ступень времени между двумя смежными защитами, покажем графически согласование времени действия защит (рис. 7-17).

Рассматривая диаграмму выдержек времени на рис. 7-17, можно заметить, что направленность действия требуется не для всех защит. Например, выдержка времени защиты A_3 больше, чем защиты B_2 ; следовательно, селективность защиты A_3 при направлении мощности к. з. к шинам может быть обеспечена без органа направления. То же самое относится и к защите B_6 . Отсюда вытекает общее правило, что орган направления должен устанавливаться на тех защитах, у которых при направлении мощности к. з. к шинам нельзя обеспечить селективность посредством выдержки времени. В тех же случаях, когда при направлении мощности к. з. к шинам селективность удастся обеспечить при помощи выдержки времени, можно применять максимальную

токовую защиту. Для выяснения, в каких именно точках сети можно установить ненаправленные защиты, нужно сначала выбрать выдержки времени по встречно ступенчатому принципу.

Защита должна согласовываться по времени не только с защитами, установленными на транзитных линиях кольцевой или радиальной сети, но также с защитами других присоединений, отходящих от шин противоположной подстанции. Так, например, защита 4 на рис. 7-1, б должна иметь выдержку времени, согласованную с защитой 6 и защитой 8. Выдержка времени t_4 выбирается на ступень выше той защиты, у которой время действия больше. Если $t_8 > t_6$, то $t_4 = t_8 + \Delta t$.

7-7. МЕРТВАЯ ЗОНА

Выше указывалось на возможность отказа в действии реле мощности при к. з. вблизи места установки защиты вследствие недостаточной величины напряжения (рис. 7-18). Участок линии m при к. з., в пределах которого реле мощности не работает из-за того, что мощность на его зажимах оказывается меньше мощности срабатывания, называется мертвой зоной.

Для характеристики чувствительности защиты важно знать протяженность мертвой зоны m . Подсчет мертвой зоны ведется для металлического трехфазного к. з. на границе мертвой зоны в точке M , где мощность на зажимах реле $S_p = S_{c.p}$. Зная выражение и величину $S_{c.p}$ и вычислив ток в реле I_p (для упрощения этот ток заменяется током при к. з. в начале линии), можно определить наименьшее значение U_p , необходимое для срабатывания реле (т. е. найти $U_{c.p}$ при заданном $S_{c.p}$ и вычисленном I_p). По найденному $U_{c.p}$ определяется расстояние, т. е. мертвая зона m (рис. 7-18).

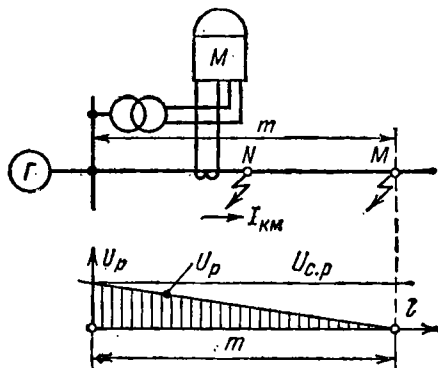


Рис. 7-18. Мертвая зона реле направления мощности.

Рассмотрим в качестве примера порядок вычисления мертвой зоны для реле мощности, имеющего:

$$S_{c.p} = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p). \quad (7-6)$$

При к. з. на границе мертвой зоны в точке M (рис. 7-18)

$$U_p = U_{c.p} = \frac{S_{c.p}}{I_p \sin(\alpha - \varphi_p)}. \quad (7-7)$$

Для вычисления $U_{с.р}$

а) определяют $S_{с.р}$, пользуясь лабораторными испытаниями или заводскими данными;

б) вычисляют ток в реле при трехфазном к. з. в самом начале линии (точка N), тогда

$$I_p = \frac{I_{кN}^{(3)}}{n_T};$$

в) вычисляют $\sin(\alpha - \varphi_p)$, для чего сначала находят $\varphi_K = \arctg(x_y/r_y)$, здесь x_y и r_y — удельные сопротивления данной линии; зная φ_K и схему включения реле, можно найти φ_p , например: для 90-градусной схемы $\varphi_p = \varphi_K - 90^\circ$; зная угол внутреннего сдвига α , можно найти $\sin(\alpha - \varphi_p)$;

г) подставляют в выражение (7-7) $S_{с.р}$, I_p и $\sin(\alpha - \varphi_p)$ и находят $U_{с.р}$. После этого вычисляют первичное фазное напряжение $U_{\phi 1}$, необходимое для срабатывания реле.

Если реле включено на фазное напряжение, то $U_{\phi 1} = U_{с.р} n_n$, где n_n — коэффициент трансформации трансформатора напряжения.

При включении на линейное напряжение $U_{\phi 1} = U_{с.р}/\sqrt{3}$.

Определяют величину сопротивления z_m участка m , в котором падение напряжения от тока $I_{кN}$ равно $U_{\phi 1}$:

$$z_m = \frac{U_{\phi 1}}{I_{кN}}.$$

Определяют длину мертвой зоны $m = z_m/z_y$ (км), где z_y — удельное сопротивление 1 км линии:

$$z_y = \sqrt{x_y^2 + r_y^2}.$$

Мертвая зона является недостатком защиты. Однако опыт эксплуатации показывает, что в случае применения чувствительных реле отказ последних из-за мертвой зоны крайне редок вследствие малого значения m .

7-8. ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ОТСЕЧКИ

Токковые направленные отсечки основаны на том же принципе, что и токовые ненаправленные отсечки (см. гл. 5).

Реле направления мощности в схеме отсечки не позволяет ей действовать при мощности к. з., направленной к шинам. Следовательно, отстройка тока срабатывания направленной отсечки ведется только от токов к. з., направленных от шин подстанции. В этом заключается принципиальное отличие направленной отсечки от ненаправленной.

Направленная отсечка применяется в сети с двусторонним питанием, когда токовая отсечка оказывается слишком грубой из-за необходимости отстройки ее от тока к. з., притекающего с противоположного конца защищаемой линии к шинам подстанции, где установлена отсечка.

В этом случае ток срабатывания у направленной отсечки меньше, чем у ненаправленной; поэтому зона действия у первой отсечки значительно больше, чем у второй.

Вследствие наличия мертвой зоны у реле мощности направленная отсечка должна применяться только в тех случаях, когда простая отсечка не удовлетворяет условию чувствительности. Схема мгновенной направленной отсечки отличается от схемы направленных токовых защит (рис. 7-4) только отсутствием реле времени.

Направленные отсечки выполняются мгновенными и с выдержкой времени. Выбор тока срабатывания производится, как и у простой токовой отсечки, по выражению (5-2) (см. § 5-3) с тем отличием, что направленную отсечку не требуется отстраивать от к. з. за шинами данной подстанции, так как в этом случае мощность направлена к шинам и отсечка блокируется реле мощности. Направленные отсечки реагируют на токи качаний. Поэтому их следует отстраивать от токов при качаниях, как это было показано в § 5-5, или снабжать блокировкой от качаний, если отстройка от токов качания вызывает недопустимое загробление отсечки.

В ряде случаев оказывается возможным применять трехступенчатые направленные защиты, состоящие из мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и чувствительной токовой защиты. Применение ступенчатой токовой направленной защиты следует рекомендовать во всех случаях, когда она удовлетворяет требованиям чувствительности и быстродействия.

7-9. КРАТКАЯ ОЦЕНКА ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ

Принцип действия токовых направленных защит прост и надежен и позволяет обеспечить селективную защиту сетей с двусторонним питанием. Сочетание направленных отсечек с направленной токовой защитой дает возможность получить защиту, во многих случаях обеспечивающую достаточную быстроту отключения к. з. и чувствительность. Опыт эксплуатации показывает, что направленная защита работает надежно.

К недостаткам защиты следует отнести:

- 1) большие выдержки времени, особенно вблизи источников питания;
- 2) недостаточную чувствительность в сетях с большими нагрузками и небольшими относительно их кратностями тока к. з.;
- 3) мертвую зону при трехфазных к. з.;
- 4) возможность неправильного выбора направления при нарушении цепи напряжения, питающей реле направления мощности.

Максимальная направленная защита широко применяется в качестве основной защиты сетей напряжением до 35 кВ с двусторонним питанием.

В сетях 110 и 220 кВ направленная токовая защита применяется в основном как резервная, а иногда, в сочетании с отсечкой, как основная.

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С БОЛЬШИМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для защиты линий от к. з. на землю (однофазных и двухфазных) применяется защита, реагирующая на ток и мощность нулевой последовательности. Необходимость специальной защиты от к. з. на землю вызывается тем, что этот вид повреждений является преобладающим, а защита, включаемая на ток и напряжение нулевой последовательности, осуществляется более просто и имеет ряд преимуществ по сравнению с рассмотренной выше токовой защитой, реагирующей на полные токи фаз. Защиты нулевой последовательности выполняются в виде токовых максимальных защит и отсечек как простых, так и направленных.

Напомним некоторые положения, касающиеся токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих в сети при к. з. на землю (подробнее см. [Л. 29, 32]):

1. Ток и напряжение нулевой последовательности в какой-либо точке сети равны:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C); \quad (8-1)$$

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \quad (8-1a)$$

где $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C, \dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — фазные токи и напряжения в той точке сети, в которой определяются $\dot{U}_0$ и $\dot{I}_0$.

Из этих выражений следует, что если геометрическая сумма фазных токов или фазных напряжений равна нулю, то $\dot{I}_0$ и $\dot{U}_0$ также равны нулю. Поэтому в нормальном режиме при качаниях и к. з. между фазами $\dot{I}_0$ и $\dot{U}_0$ отсутствуют и возникают только при замыканиях на землю или неполнофазных режимах¹, когда нарушается симметрия фазных токов и напряжений сети:

$$\dot{U}_{AK} = \dot{U}_{A1} + \dot{U}_{A2} + \dot{U}_{A0}; \quad \dot{U}_{BK} = \dot{U}_{B1} + \dot{U}_{B2} + \dot{U}_{B0};$$

$$\dot{U}_{CK} = \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{C0}; \quad \dot{U}_{A0} = \dot{U}_{B0} = \dot{U}_{C0} = \dot{U}_{0K}.$$

2. Пользуясь выражениями (8-1) и (8-1a), установим связь между составляющими нулевой последовательности и полными фазными токами и напряжениями при однофазном к. з.

Например, при к. з. на фазе *A* (рис. 8-1, а и 3-12, в) токи в месте повреждения (между точкой *K* и землей) равны: $\dot{I}_A = \dot{I}_K, \dot{I}_B = 0; \dot{I}_C = 0$. Подставив эти значения токов в (8-1), найдем:

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} \dot{I}_A = \frac{1}{3} \dot{I}_K,$$

$$\text{откуда } \dot{I}_K = 3\dot{I}_0. \quad (8-2)$$

¹ Неполнофазным режимом называется такой режим, при котором на одном из участков сети отключены или оборваны одна или две фазы.

Напряжение поврежденной фазы в месте к. з. (точка K) $U_{AK} = 0$, так как эта фаза связана с землей. С учетом этого из (8-1а) получим

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3} (\dot{U}_B + \dot{U}_C). \quad (8-3)$$

Таким образом, из сказанного следует, что при однофазном к. з. ток нулевой последовательности в месте повреждения равен $1/3$ тока к. з. в той же точке и совпадает с ним по фазе, а напряжение U_{0K} в точке к. з. равно $1/3$ геометрической суммы напряжений неповрежденных фаз. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном к. з. приводятся на рис. 8-9.

3. Для анализа работы защит нулевой последовательности и расчета токов к. з. необходимо определять распределение (пути прохождения) токовой нулевой последовательности в конкретных схемах сети.

Из теории симметричных составляющих известно, что распределение токов нулевой последовательности может рассматриваться независимо от токов прямой и обратной последовательностей.

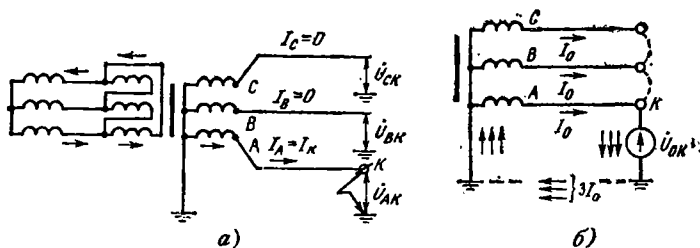


Рис. 8-1. Однофазное к. з. в сети (а) и прохождение токов I_0 под действием U_{0K} (б).

Источником появления токов нулевой последовательности можно считать напряжение U_{0K} , появляющееся на каждой фазе в месте к. з. (точка K на рис. 8-1, а и б). Под влиянием этого напряжения в каждой фазе возникают токи I_0 . Они замыкаются по контуру фаза — земля через место повреждения (точка K) и заземленные нейтрали.

Так как неповрежденные фазы не связаны с точкой повреждения непосредственно, то для образования контура циркуляции токов I_0 необходимо представить, что в месте замыкания на землю имеется условное соединение между всеми фазами (показанное на рис. 8-1, б пунктиром). Тогда в месте замыкания на землю проходит ток, равный сумме токов нулевой последовательности I_0 всех трех фаз, который и является действительным током повреждения: $I_K = 3I_0$. Этот ток направляется через землю к заземленным нейтралям трансформаторов и через них возвращается в фазы сети.

Таким образом, при замыкании на землю появление токов I_0 возможно только в сети, где имеются трансформаторы с заземленными нейтральями.

При нескольких заземленных нейтральных ток нулевой последовательности, возникший в месте повреждения, разветвляется между нейтральями обратно пропорционально сопротивлениям их ветвей.

На рис. 8-2 показаны некоторые характерные случаи распределения токов нулевой последовательности в схемах сети. Направление токов, проходящих к месту к. з., принято за положительное.

Если заземлена нулевая точка трансформатора только с одной стороны линии электропередачи (рис. 8-2, а), то при замыкании на землю на этой линии токи нулевой последовательности проходят только на участке между местом повреждения и заземленной нулевой точкой.

Если же заземлены нулевые точки трансформаторов с двух сторон рассматриваемого участка (рис. 8-2, б), то токи нулевой последовательности проходят по нему с обеих сторон от места к. з.

Это позволяет сделать вывод, что распределение токов нулевой последовательности в сети определяется расположением не генераторов, а заземленных нейтралей.

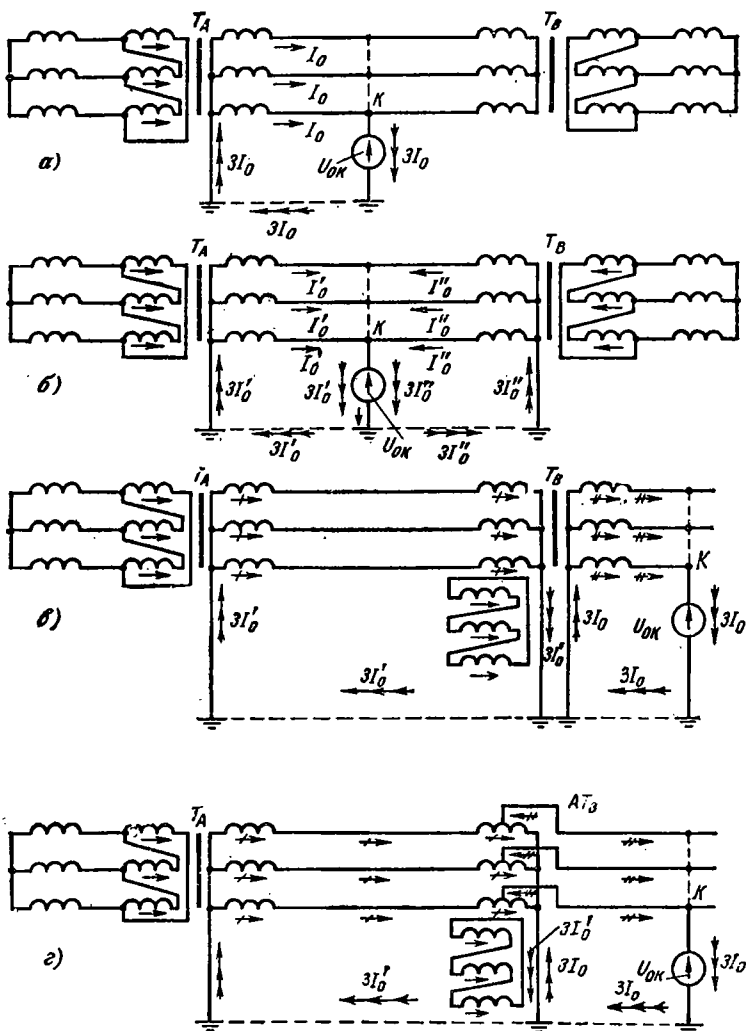


Рис. 8-2. Распределение токов нулевой последовательности при однофазном к. з.

а — при заземлении нейтрали с одной стороны линии; б — при заземленных нейтралях с обеих сторон линии; в — при заземлении нейтралей в сети высшего и низшего напряжения; г — при к. з. в сети с автотрансформатором.

Если трансформатор имеет соединение обмоток звезда — треугольник, то замыкание на землю на стороне треугольника не вызывает токов нулевой последовательности на стороне звезды. Поэтому защиты, установленные в сети звезды, не действуют при замыкании на землю в сети треугольника.

Если же сети различных напряжений связаны трансформатором, имеющим соединение обмоток звезда — звезда, с заземленными нулевыми точками обоих обмоток (рис. 8-2, в), то замыкание на землю в сети одной звезды вызывает появление токов нулевой последовательности в сети второй звезды. Для устранения этой связи необходимо разземлить нейтраль одной из обмоток трансформатора T_B .

При наличии автотрансформатора AT_B , связывающего сети двух напряжений (рис. 8-2, г), замыкание на землю в сети одного напряжения вызывает появление токов нулевой последовательности в сети другого напряжения, так же как и в схеме на рис. 8-2, в.

4. Из схемы замещения нулевой последовательности, приведенной на рис. 8-3, б, следует, что напряжение U_0 в какой-либо точке сети, например в точке P , всегда меньше напряжения U_{0K} в точке к. з. K на величину падения напряжения в сопротивлении $x_{0(K-P)}$ между точками K и P , т. е.

$$\dot{U}_{0P} = \dot{U}_{0K} - \dot{I}_0 x_{0(K-P)}. \quad (8-4)$$

Таким образом, чем дальше отстоит точка P от места повреждения K , тем меньше напряжение U_{0P} .

В месте заземленных нейтралей трансформаторов (точка H) напряжение $U_{0H} = 0$, так как точка H непосредственно связана с землей. Зависимость $U_{0P} = f(l_{(H-P)})$ имеет линейный характер и представлена на рис. 8-3, в. Для сравнения на рис. 8-3 показано изменение напряжения поврежденной фазы U_A в зависимости от расстояния до точки K . Учитывая, что в точке H напряжение U_{0H} равно нулю, напряжение U_0 в точке P можно определять как падение напряжения от точки H до точки P в сопротивлении $x_{0(H-P)}$

$$U_{0P} = I_0 x_{0(H-P)}. \quad (8-4a)$$

8-2. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Схема и принцип действия защиты

Защита (рис. 8-4) состоит из пускового токового реле I и реле времени 2 . Реле I включается на фильтр тока нулевой последовательности, в качестве которого обычно используется нулевой провод трансформаторов тока, соединенных по схеме полной звезды. Реле времени 2 создает выдержку времени, необходимую по условию селективности.

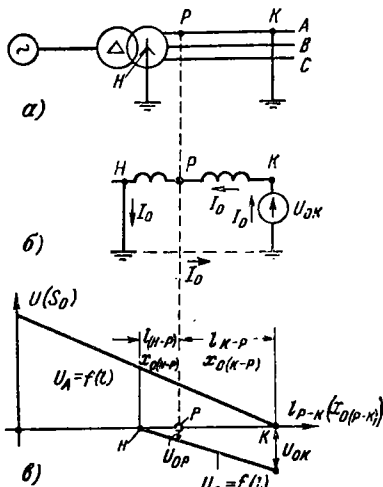


Рис. 8-3. Однофазное к. з.

а — участок сети с однофазным к. з.; б — схема замещения нулевой последовательности; в — зависимость $U_0 = f(l_{P-K})$ и $U_\phi = f(l_{P-K})$.

Ток в реле I равен сумме вторичных токов трех фаз; пренебрегая погрешностью трансформаторов тока, получаем:

$$I_p = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{n_T} = \frac{3\dot{I}_0}{n_T}. \quad (8-46)$$

Согласно (8-46) и § 3-6, б ток в пусковом реле защиты появляется только в том случае, когда имеется ток I_0 . Поэтому защита нулевой последовательности, показанная на рис. 8-4, может работать при однофазных и двухфазных к. з. на землю.

При междуфазных к. з. (без «земли»), а также при нагрузке и качаниях защита нулевой последовательности не действует, поскольку в этих режимах сумма токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$ и ток I_0 отсутствует.

Важным преимуществом защиты нулевой последовательности является то, что она не реагирует на нагрузку. Благодаря этому ее не требуется отстраивать от токов нормального режима и перегрузок, что позволяет обеспечить высокую чувствительность этой защиты по сравнению с защитами, реагирующими на фазные токи.

Однако в действительности работа защиты осложняется

погрешностью трансформаторов тока, обусловленной их током намагничивания (см. § 3-1).

Поэтому в режимах, когда имеет место баланс первичных токов ($\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$), сумма вторичных токов $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \neq 0$. В нулевом проводе и пусковом реле защиты появляется остаточный ток, называемый током небаланса ($I_{нб}$), который может вызвать нежелательное действие защиты при отсутствии тока I_0 .

б) Ток небаланса

Значение $I_{нб}$ можно найти, если в выражении (8-46) учесть токи намагничивания трансформаторов тока; тогда

$$\begin{aligned} I_p &= \left(\frac{\dot{I}_A - \dot{I}_{A \text{ нам}}}{n_T} \right) + \left(\frac{\dot{I}_B - \dot{I}_{B \text{ нам}}}{n_T} \right) + \left(\frac{\dot{I}_C - \dot{I}_{C \text{ нам}}}{n_T} \right) = \\ &= \frac{\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C}{n_T} - \left(\frac{\dot{I}_{A \text{ нам}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{B \text{ нам}}}{n_T} + \frac{\dot{I}_{C \text{ нам}}}{n_T} \right). \end{aligned} \quad (8-5)$$

Очевидно, что второй член в выражении (8-5) является током небаланса. Обозначив его $I_{нб}$ и выразив первый член (8-5) через I_0 , получим:

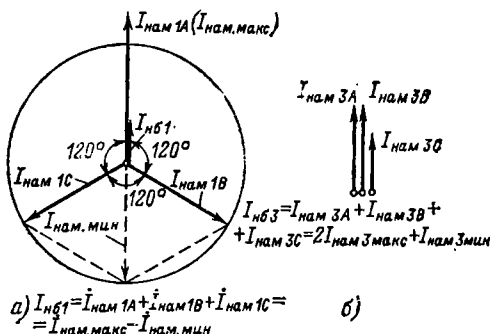
$$I_p = \frac{3I_0}{n_T} - I_{нб}. \quad (8-6)$$

Выражение (8-6) показывает, что ток в пусковом реле защиты состоит из двух слагающих: одно обусловлено первичным током I_0 и второе — погрешностью трансформаторов тока. Последнее искажает величину тока $3I_0$, на которую реагирует защита.

Как следует из (8-5), ток небаланса равен геометрической сумме намагничивающих токов трансформаторов тока:

$$I_{нб} = \frac{I_{А \text{ нам}}}{n_T} + \frac{I_{В \text{ нам}}}{n_T} + \frac{I_{С \text{ нам}}}{n_T}. \quad (8-7)$$

Сумма намагничивающих токов обычно не равна нулю. Это объясняется тем, что токи намагничивания имеют несинусоидальную форму и, кроме того, различаются по величине и фазе вследствие нелинейности и неидентичности характеристик намагничивания и неравенства в величине вторичных нагрузок трансформаторов тока различных фаз.



Токи намагничивания состоят в основном из первой и третьей гармоник $I_{нам1}$ и $I_{нам3}$ [Л. 35, 23]. При трехфазных к. з., качаниях и нагрузке токи третьей гармоники $I_{нам3}$ фаз А, В и С практически совпадают по фазе и поэтому суммируются в нулевом проводе трансформаторов тока арифметически (рис. 8-5, б).

При тех же режимах токи $I_{нам1}$ сдвинуты по фазе циклически приблизительно на 120° и суммируются в нулевом проводе геометрически (рис. 8-5, а).

В результате этого ток небаланса состоит, так же как и ток намагничивания, из первой и третьей гармоник ($I_{нб1}$ и $I_{нб3}$).

Исследования показывают, что третьи гармоники $I_{нам3}$ составляют около 20 — 40%, а первые $I_{нам1}$ — 80 — 60% полного тока намагничивания.

Имея кривые намагничивания трансформаторов тока $E_2 = f(I_{нам})$ и определяя вторичные э. д. с. трансформаторов тока E_2 , можно приближенно оценить [Л. 10] величины намагничивающих токов, а затем $I_{нб1}$ и $I_{нб3}$, пользуясь формулами (8-8), вытекающими из диаграмм на рис. 8-5:

$$\left. \begin{aligned} I_{нб1} &= 0,66 (I_{нам.макс} - I_{нам.мин}); \\ I_{нб3} &= 0,34 (I_{нам.мин} + 2I_{нам.макс}), \end{aligned} \right\} \quad (8-8)$$

где $I_{нам.макс}$ и $I_{нам.мин}$ — максимальные ($I_{нам1А}$) и минимальные значения $I_{нам}$ ($I_{нам1В}$ и $I_{нам1С}$), найденные по кривым намагничивания.

*Действующее значение полного тока небаланса в нулевом проводе назов-
дится по выражению*

$$I_{\text{нб}} = \sqrt{I_{\text{нб1}}^2 + I_{\text{нб3}}^2} \quad (8-8a)$$

Значение тока $I_{\text{нб, макс}}$ в нулевом проводе звезды трансформаторов тока обычно определяется при токе трехфазного к. з. в расчетной точке, поскольку $I_{\text{к}}^3$, как правило, больше, чем двухфазный ток к. з.

Для ограничения тока небаланса необходимо работать в ненасыщенной части характеристики намагничивания и иметь одинаковые токи намагничивания во всех фазах. Чтобы обеспечить эти условия, трансформаторы тока, питающие защиту, должны:

а) удовлетворять условию 10 %-ной погрешности при максимальном значении тока трехфазного к. з. в начале следующего участка;

б) иметь идентичные (совпадающие) характеристики намагничивания на всех трех фазах;

в) иметь одинаковые нагрузки вторичных цепей во всех фазах.

В неустановившихся режимах под влиянием апериодического тока к. з. токи намагничивания, а вместе с ними и токи небаланса могут значительно возрасти, что необходимо учитывать при выборе параметров защит, работающих без выдержки времени.

Чтобы исключить действие защиты от токов небаланса, величину тока срабатывания пусковых реле защиты выбирают больше тока небаланса.

в) Уставки защиты

Время действия каждой защиты нулевой последовательности выбирается по условию селективности на ступень Δt больше t защиты предыдущего участка. Например, у защиты 1 (рис. 8-6) $t_1 = t_2 + \Delta t$. Величина Δt выбирается согласно (4-9). Выбирая выдержку времени на защите реагирующей на $3I_0$, необходимо учитывать, что эта защита может не действовать при к. з. за трансформатором, если при этом в рассматриваемой защите ток $3I_0 = 0$. Как уже отмечалось, при замыканиях на землю в сети одного напряжения появление тока I_0 в сети другого напряжения зависит от соединения обмоток трансформатора, связывающего эти сети, и заземления нейтралей в этих сетях.

Если сети высшего и низшего напряжений связаны между собой через трансформатор $T3$ с соединением обмоток Δ/Δ или Δ/Δ , то защита нулевой последовательности 3, установленная на трансформаторе $T3$, может быть мгновенной, поскольку она не действует при к. з. и замыканиях на землю на стороне низшего напряжения. В результате этого выдержки времени (t_2 и t_1) остальных защит нулевой последовательности существенно уменьшаются и получаются меньше, чем t' у защит от междофазных к. з., реаги-

рующих на фазный ток (рис. 8-6). Это объясняется тем, что последние действуют при к. з. за трансформатором, вследствие чего их приходится согласовывать по времени с защитами на стороне низшего напряжения трансформаторов (рис. 8-6). Если же связь между сетями разного напряжения осуществляется через автотрансформатор ТЗ или трансформатор с соединением обмоток Δ/Δ , имеющим заземленные нейтрали, то, как показано на рис. 8-2, при замыкании на землю в сети одного напряжения ток I_0 появится в обеих сетях. В этом случае выдержки времени защиты нулевой последовательности сети одного напряжения должны согласовываться с защитами сети другого напряжения.

В этих условиях защита 3, работающая в предыдущем случае без выдержки времени ($t_3 = 0$), будет иметь теперь $t_3 = t_4 + \Delta t$, т. е. время действия защит, реагирующих на ток I_0 , увеличивается и получается равным времени действия максимальных защит, реагирующих на фазный ток.

Ток срабатывания пусковых реле максимальной защиты нулевой последовательности выбирается: 1) из условия надежного действия защиты при к. з. в конце следующего (второго) участка и 2) из условия отстройки от токов небаланса.

По первому условию $I_{с.з} > 3I_{0\text{мин}}$, а по второму $I_{с.з} > I_{нб.\text{макс}}$. Определяющим является второе условие

$$I_{с.з} = k_n I_{нб.\text{макс}}, \quad (8-9)$$

где $k_n = 1,3 \div 1,5$. Ток $I_{нб.\text{макс}}$ рассчитывается для нормального режима или для режима к. з. в зависимости от выдержки времени защиты. Если выдержка времени t_0 защиты нулевой последовательности превышает время действия $t_{м.ф}$ защит от междофазных к. з., установленных на следующем участке, то $I_{с.з}$ защиты нулевой последовательности отстраивается только от небалансов в нормальном режиме, поскольку междофазные повреждения отключаются быстрее, чем может подействовать защита нулевой последовательности.

Ток небаланса в нормальном режиме $I_{нб(н)}$ обычно определяется измерением. У трансформаторов тока с $I_{2\text{ном}} = 5 \text{ А}$ его значение колеблется от 0,01 до 0,2 А. Поэтому ток срабатывания по второму

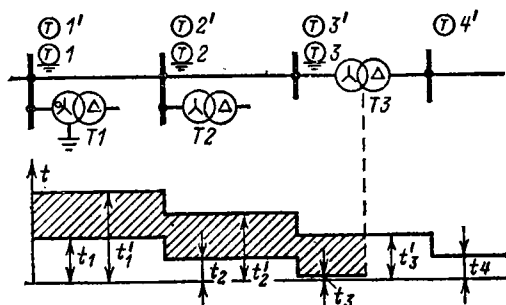


Рис. 8-6. Ступенчатый принцип выбора выдержек времени максимальной токовой защиты нулевой последовательности.

1', 2', 3', 4' — максимальные токовые защиты; 1, 2, 3 — максимальные токовые защиты нулевой последовательности.

условию можно выбрать очень маленьким: примерно 0,5 — 1 а вторичных (или 10—20% от $I_{\text{ном}}$ трансформаторов тока).

Если $t_0 < t_{\text{м.ф.}}$, то защиту нужно отстраивать от небаланса $I_{\text{нб(н)}}$ при трехфазных к. з. в начале следующего участка. Отстройка ведется от максимального $I_{\text{нб(к)}}$ при установившемся режиме, поскольку защита действует с выдержкой времени 0,5 с и больше. По данным опыта эксплуатации при правильно выбранных трансформаторах тока и их равномерной нагрузке ток срабатывания можно выбрать в зависимости от значения кратности тока к. з. 2—4 А (вторичного тока).

Установившийся ток небаланса при к. з., необходимый для определения $I_{\text{с.з.}}$, должен находиться по выражению (8-8) и (8-8а).

Если трансформаторы тока работают в прямолинейной части характеристики, то тогда третьи гармоники в $I_{\text{нам}}$ малы. В этом случае можно пренебречь составляющей $I_{\text{нбз}}$, рассчитывая ток небаланса по выражению (8-7):

$$I_{\text{нб}} = k_{\text{одн}} f_i I_{\text{к}}^{(3)}, \quad (8-10)$$

где $k_{\text{одн}}$ в зависимости от идентичности характеристик и нагрузок трансформаторов тока выбирается от 0,5—1; f_i — погрешность трансформаторов тока, при подборе их по кривым предельной кратности принимается равным 0,1;

$I_{\text{к}}^{(3)}$ — максимальное значение тока трехфазного к. з. при повреждении в начале следующего участка.

Следует иметь в виду, что формула (8-10) дает приближенные результаты, что учитывается при выборе значения $k_{\text{н}}$ в (8-9).

Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом чувствительности

$$k_{\text{ч}} = \frac{3I_{0\text{мин}}}{I_{\text{с.з}}}, \quad (8-11)$$

где $I_{0\text{мин}}$ — минимальный ток нулевой последовательности при однофазном или двухфазном к. з. на землю в конце второго участка. Надежность считается достаточной при $k_{\text{ч}} \geq 1,5$.

Если в сети, где установлена защита, возможна работа какой-либо линии на двух фазах (например, во время действия ОАПВ), то ток срабатывания защиты нужно дополнительно отстроить от токов нулевой последовательности $3I_0$, появляющихся в указанном режиме, или принять выдержки времени защиты больше $t_{\text{ОАПВ}}$.

8-3. ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

В сетях с заземленными нулевыми точками, расположенными с обеих сторон рассматриваемого участка сети, селективное действие максимальной токовой защиты нулевой последовательности можно обеспечить только при наличии органа направления мощности (по соображениям, аналогичным в § 7-1).

Направленные защиты нулевой последовательности действуют при к. з. на защищаемой линии и не работают при повреждениях на всех остальных присоединениях, отходящих от данной подстанции. Такое поведение защиты обеспечивается с помощью реле направления мощности, реагирующего на знак или направление мощности нулевой последовательности при к. з.

Выдержки времени на защитах, действующих при одном направлении мощности, подбираются по ступенчатому принципу. На рис. 8-7 показаны размещение направленных защит нулевой последовательности и график их выдержек времени. Схема защиты приведена на рис. 8-8.

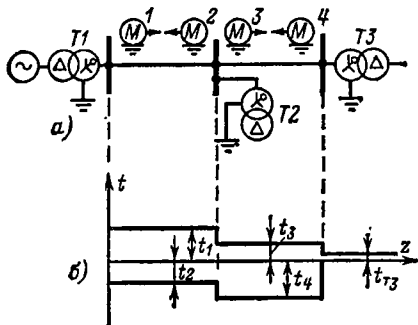


Рис. 8-7. Размещение максимальных направленных защит нулевой последовательности (а) и график их выдержки времени (б).

М — максимальная направленная защита нулевой последовательности.

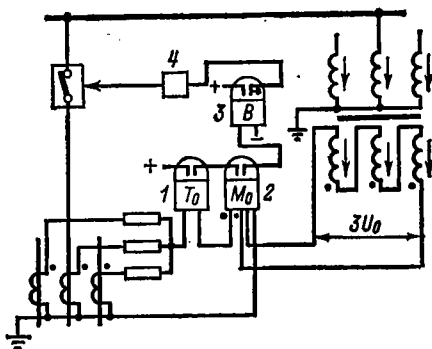


Рис. 8-8. Схема токовой направленной защиты нулевой последовательности.

Защита состоит из токового реле 1, реагирующего на появление к. з. на землю, реле мощности 2, определяющего направление мощности при к. з., и реле времени 3, создающего выдержку времени, необходимую по условию селективности.

Пусковое реле и токовая обмотка реле мощности включаются в нулевой провод трансформаторов тока на ток $3I_0$, а поляризирующая обмотка (обмотка напряжения) реле мощности питается напряжением $3U_0$ от разомкнутого треугольника трансформатора напряжения.

При таком включении реле 2 реагирует на мощность нулевой последовательности $S_0 = U_0 I_0$. С учетом угла внутреннего сдвига α поляризирующей обмотки и равенств $U_p = 3U_0$, $I_p = 3I_0$ реле направления мощности согласно (7-1) реагирует на мощность:

$$S_p = U_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p) = 3U_0 3I_0 \sin(\alpha - \varphi_0), \quad (8-12)$$

где $\varphi_p = \varphi_0$ — угол сдвига фаз между U_p и I_p или U_0 и I_0 .

Условия работы реле мощности и его поведение можно уяснить из рассмотрения векторных диаграмм напряжения и тока питаю-

ших реле (U_0 и I_0) при однофазных и двухфазных к. з. на землю (рис. 8-9 и 8-10).

Для упрощения принято, что поврежденная линия разомкнута (рис. 8-9, а). За исходные при построении всех диаграмм взяты векторы э. д. с. эквивалентного генератора системы $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$, которые можно считать не изменяющимися при к. з.

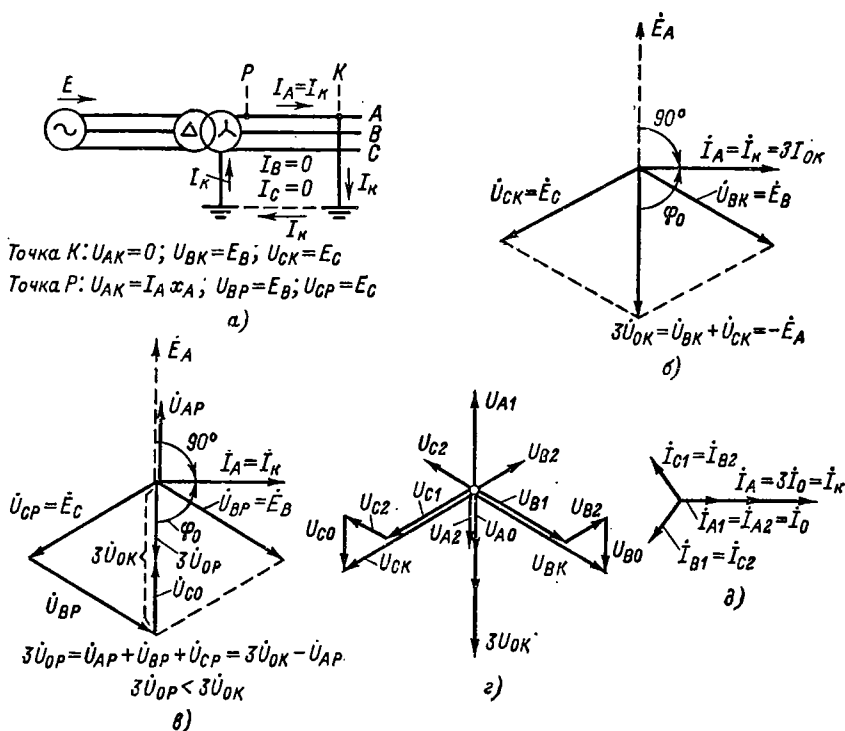


Рис. 8-9. Векторные диаграммы токов и напряжений при однофазном к. з. а — схема сети; б — диаграмма в точке К; в — диаграмма в точке Р; г, д — диаграммы, построенные с помощью симметричных составляющих.

Однофазное к. з. [Л. 32, 13], например, на фазе А характеризуется следующими условиями, вытекающими из рис. 8-9, а:

1) В поврежденной фазе А под действием э. д. с. E_A проходит ток к. з. $I_A = I_K$. Если принять активное сопротивление сети равным нулю, то ток I_A отстает от э. д. с. E_A на 90° .

2) Токи в неповрежденных фазах I_B и I_C равны нулю.

3) Напряжение поврежденной фазы А относительно земли в точке К $U_{AK} = 0$, поскольку эта фаза имеет глухое замыкание на землю.

4) Напряжения неповрежденных фаз с учетом условия (2) равны э. д. с. этих фаз: $\dot{U}_B = \dot{E}_B$ и $\dot{U}_C = \dot{E}_C$.

Для этих условий построена векторная диаграмма фазных токов и напряжений в месте повреждения в точке K (рис. 8-9, б).

Векторы $3\dot{I}_0$ и $3\dot{U}_0$ находятся на основе уравнений (8-1) и (8-1а) путем геометрического сложения векторов фазных токов и напря-

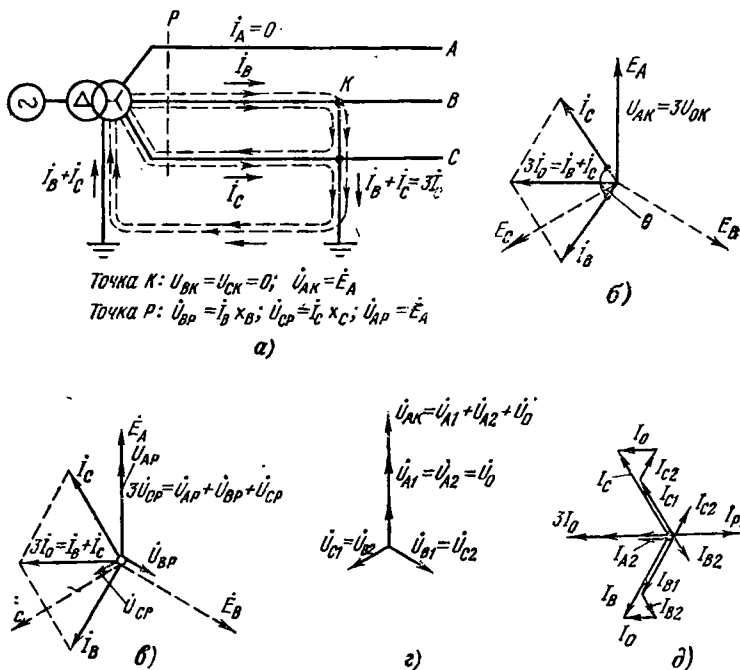


Рис. 8-10. Векторные диаграммы при двухфазном к. з. на землю.

а — токораспределение при двухфазном к. з.; б и в — диаграмма в точках K и P ; г, д — диаграммы, построенные с помощью симметричных составляющих.

жений. Согласно этим уравнениям в месте к. з. (в точке K) вектор тока $3\dot{I}_{0K} = \dot{I}_A$ и, следовательно, $\dot{I}_{0K} = \frac{1}{3} \dot{I}_A$, а вектор $3\dot{U}_{0K} = \dot{U}_{AK} = \dot{E}_A$, поэтому

$$\dot{U}_{0K} = -\frac{1}{3} \dot{E}_A. \quad (8-13)$$

Из диаграммы 8-9, б следует, что ток $\dot{I}_{0K}$ опережает напряжение $\dot{U}_{0K}$ на 90° .

Векторная диаграмма однофазного к. з. в точке P , удаленной от места к. з., отличается от предыдущего случая величиной $\dot{U}_A$

и U_0 . Напряжение поврежденной фазы A в точке P $U_{AP} \neq 0$, оно равно падению напряжения в сопротивлении $x_{(P-K)}$ (рис. 8-9, а): $\dot{U}_{AP} = j\dot{I}_{0K}x_{(P-K)}$. Напряжения неповрежденных фаз B и C в точке P равны э. д. с. соответствующих фаз (рис. 8-9, в).

Векторы $\dot{U}_{0P}$ и $\dot{I}_{0K}$ аналогично предыдущему находятся геометрическим суммированием фазных напряжений и токов. В соответствии с этим $\dot{I}_{0P} = \frac{1}{3}\dot{I}_A$, $\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP})$. Как следует из диаграммы, $U_{0P} > U_{0K}$.

При двухфазном к. з. на землю [Л. 32, 13] векторная диаграмма токов и напряжений в месте повреждения фаз B и C приведена на рис. 8-10, б.

Этот вид повреждения характеризуется в месте к. з. (точка K) тремя условиями, очевидными из рис. 8-10, а: $U_{BK} = 0$; $U_{CK} = 0$; $I_A = 0$.

Напряжение в неповрежденной фазе $\dot{U}_A = \dot{E}_A$. В поврежденных фазах под действием э. д. с. $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ проходят токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$. Каждый из этих токов состоит из двух составляющих, показанных на рис. 8-10, б пунктиром.

Одна составляющая замыкается по контуру поврежденных фаз B и C и обуславливается разностью э. д. с. $\dot{E}_B - \dot{E}_C$, а вторая проходит по контуру поврежденная фаза — земля под действием $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ соответственно.

Результирующие токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ в отличие от токов при двухфазном к. з. без земли сдвинуты между собой на угол θ , меньший 180° (рис. 8-10, б).

Векторы $\dot{I}_0$ и $\dot{U}_0$ находятся геометрическим суммированием фазных токов и напряжений:

$$\dot{U}_{0K} = \frac{1}{3}\dot{U}_{AK}, \text{ а } \dot{I}_{0K} = \frac{1}{3}(\dot{I}_B + \dot{I}_C).$$

Диаграмма для точки P , находящейся на некотором удалении от места повреждения, представлена на рис. 8-10, в. Очевидно, что токи в точке P такие же, как и в точке K .

Напряжение неповрежденной фазы также не меняется. Напряжение поврежденных фаз U_{BP} и U_{CP} больше нуля. Они равны падению напряжения от точки K до точки P .

Напряжение $\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP})$; с учетом того, что $\dot{U}_{AP} = -\dot{E}_A$, находим:

$$\dot{U}_{0P} = \frac{1}{3}(\dot{E}_{AP} + \dot{U}_{BP} + \dot{U}_{CP}).$$

Отсюда и из векторной диаграммы следует, что $U_{0P} < U_{0K}$. Ток $\dot{I}_0$ опережает $\dot{U}_{0K}$ и $\dot{U}_{0P}$ на угол φ_{0K} . Если не учитывать активного сопротивления, то $\varphi_{0K} = 90^\circ$.

Приведенные диаграммы построены с указанными выше допущениями и являются поэтому приближенными.

Более строго и точно подобные диаграммы могут быть построены на основе совместного решения уравнений, характеризующих данный вид повреждений, выражающих связь симметричных составляющих с фазными токами и напряжениями. Построенные подобным способом диаграммы для места к. з. показаны на рис. 8-9, г, д и 8-10, г, д; там же приведены исходные уравнения (подробнее о этих диаграммах см. [Л. 10, 13, 32]).

Векторные диаграммы на рис. 8-9 и 8-10 позволяют сделать следующие выводы:

1. Угол сдвига $\varphi_p = \varphi_0$, определяющий знак и величину мощности S_p , на которую реагируют реле мощности нулевой последовательности, равен согласно рис. 8-9, б и в 90° . При учете активного сопротивления сети φ_0 составляет $100-120^\circ$.

Отсюда следует, что для направленной защиты нулевой последовательности необходимо применять реле мощности синусного или смешанного типа, имеющие максимальный момент в диапазоне значений $\varphi_p = 90 \div 120^\circ$.

К подобным реле относятся реле типов РБМ-177 и РБМ-178, у которых $M_p = kU_p I_p \sin(\alpha - \varphi_p)$ и угол $\alpha = -20^\circ$.

Угол максимальной чувствительности у этих реле, как следует из приведенного выше выражения, $\varphi_{м.ч} = \alpha - 90^\circ = -20^\circ - 90^\circ = -110^\circ$ или при принятии заводом обозначении однополярных зажимов тока и напряжения $\varphi_{м.ч} = 180 - 110 = +70^\circ$. Это значение $\varphi_{м.ч}$ указывается в каталогах и справочниках.

2. Ток $3I_0$ при однофазном к. з. равен I_n (в режиме одностороннего питания), а при двухфазном к. з. с землей — геометрической сумме токов поврежденных фаз, т. е. току к. з., проходящему через землю.

3. Напряжение $3U_0$ имеет наибольшее значение (равное фазному напряжению) в месте к. з. (точка К).

По мере удаления от точки повреждения К напряжение $3U_0$ уменьшается. Это вытекает из диаграмм на рис. 8-9, б, в и 8-10, б, в, а также из уравнения (8-2в) и показано графически на рис. 8-3.

Из выражения (8-2в) и рис. 8-3, в следует, что чем дальше от места к. з. находится реле мощности, тем хуже условия его работы. Действительно, мощность S_p на зажимах реле уменьшается с уменьшением U_0 . Зависимость $U_0 = f(l_{p-K})$ (рис. 8-3, в) может рассматриваться как зависимость $S_0 = f(l_{p-K})$, если принять, что I_p и φ_p постоянны. При удаленных к. з. мощность S_p может оказаться меньше $S_{с.р.}$, в результате чего реле мощности, а следовательно, и защита не будут работать.

Для расширения зоны действия защиты нулевой последовательности необходимы высокочувствительные реле мощности.

4. Векторные диаграммы, особенно при однофазном к. з., наглядно показывают, что при положительном φ_n угол φ_0 отрицателен.

Это означает, что мощность S_0 и мощность к. з. в поврежденной фазе S_n имеют противоположные знаки. Например, при однофазном к. з. на защищаемой линии (рис. 8-9, а) мощность к. з. в фазе имеет положительный знак и направлена от источника питания к месту к. з., мощность же нулевой последовательности отрицательна, т. е. направлена от места к. з. к нулевой точке трансформаторов. Поэтому обмотки напряжения и тока реле

мощности нулевой последовательности должны включаться разноименной полярностью.

Уставки направленной защиты. Ток срабатывания пускового токового реле выбирается так же, как и у ненаправленной защиты нулевой последовательности (см. § 8-2).

Чувствительность пускового реле защиты проверяется при к. з. в конце второго участка по формуле (8-11).

На очень длинных линиях следует дополнительно проверять чувствительность реле мощности при к. з. в конце зоны защиты по выражению $k_a = S_{p, \min} / S_{c.p.}$, где $S_{p, \min}$ — мощность на зажимах реле в режиме, когда U_0 и I_0 имеют минимальное значение.

Выдержки времени направленной защиты выбираются по встречно-ступенчатому принципу (рис. 8-7). Каждая защита отстраивается от соседней защиты, действующей при одном направлении мощности, на ступень Δt : $t_1 = t_3 + \Delta t$.

8-4. ОТСЕЧКИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Назначение, принцип действия и разновидности отсечек

Для ускорения отключения к. з. на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью применяются отсечки, реагирующие на ток нулевой последовательности. Принцип действия их такой же, как и у отсечек, реагирующих на фазный ток (см. гл. 5). Отсечки нулевой последовательности выполняются простыми токовыми и направленными, мгновенными и с выдержкой времени.

б) Токовые ненаправленные отсечки нулевой последовательности

Токовые (ненаправленные) отсечки нулевой последовательности применяются на линиях с односторонним питанием места к. з. токами I_0 , т. е. там, где заземленные нейтрали трансформаторов расположены с одной стороны линии (рис. 8-11).

Мгновенные отсечки нулевой последовательности отстраиваются от тока $3I_{0 \max}$ при к. з. на землю на шинах противоположной подстанции по выражению, аналогичному (5-2):

$$I_{c.з.} = k_n 3I_{0 \max}. \quad (8-14)$$

Отсечки с выдержкой времени (реле 2 на рис. 8-11, а) отстраиваются по току и времени от мгновенной отсечки нулевой последовательности 3 следующей линии Л2.

При расположении нейтралей с одной стороны защищаемой линии Л1 ток $3I_0$ в отсечках 2 и 3 при к. з. на Л2 одинаков. Поэтому, исходя из условия селективности, принимают, что

$$I_{c.з2} = (1,1 \div 1,2) I_{c.з3}. \quad (8-15)$$

Выдержка времени $t_2 = t_3 + \Delta t$.

Зона действия отсечек находится графически по точке пересечения кривой $3I_0 = f(l_{P-K})$ с прямой $I_{c.з.}$, как это показано на рис. 8-11, б.

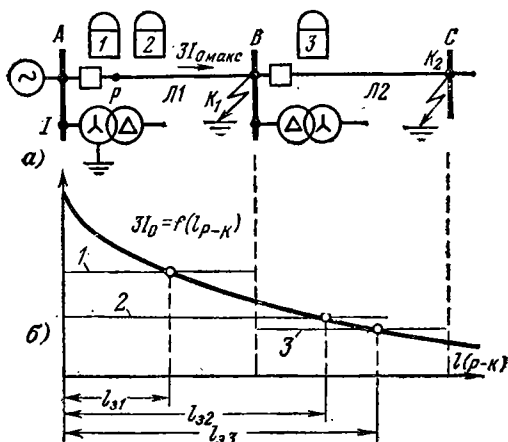


Рис. 8-11. Защита линии с помощью отсечек нулевой последовательности (а); графический расчет и зона действия этих отсечек (б); согласование времени и зон действия защит 2 и 3 (в).

1 — $I_{c.з.}$ мгновенной отсечки на линии Л1; 2 — $I_{c.з2}$ отсечки с выдержкой времени на линии Л1; 3 — $I_{c.з3}$ отсечки мгновенного действия на линии Л2; $l_{з1}$, $l_{з2}$, $l_{з3}$ — зоны действия отсечек 1, 2, 3.

Схема отсечки с выдержкой времени выполняется по рис. 8-4. Мгновенная отсечка выполняется так же, но без реле времени 2.

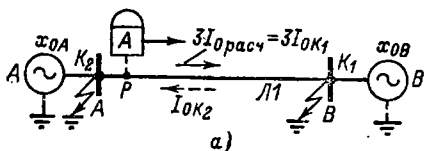
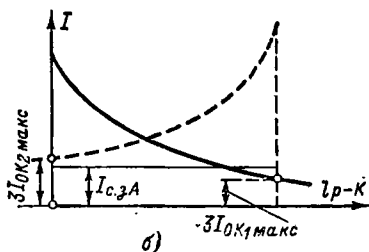


Рис. 8-12. Расчет $I_{c.з}$ мгновенной направленной отсечки нулевой последовательности в сети с двусторонним питанием токами I_0 .



Ненаправленные токовые отсечки нулевой последовательности можно применять также в сети, имеющей заземленные нейтралы с обеих сторон защищаемой линии (рис. 8-12).

В этом случае $I_{с.з}$ отстраивается от токов $3I_0$, проходящих через защиту, как и при к. з. на шинах противоположной подстанции B , так и при к. з. на шинах подстанции A , где установлена отсечка (рис. 8-12, a). Однако если $3I_{0к2} > 3I_{0к1}$, то чувствительность отсечки получается недостаточной. В этих случаях следует применять направленную отсечку нулевой последовательности.

в) Направленные отсечки нулевой последовательности

Схема направленной отсечки нулевой последовательности с выдержкой времени аналогична показанной на рис. 8-8. Направленная отсечка без выдержки времени выполняется по той же схеме, но без реле времени $З$.

Орган направления мощности, имеющийся в направленной отсечке, блокирует ее при к. з. на шинах подстанции A (рис. 8-12, a), когда мощность $S_{0к2}$ направлена от шин подстанции¹, благодаря чему отпадает необходимость отстройки защиты от тока $I_{0к2}$.

Для обеспечения селективности направленную отсечку достаточно отстроить только от тока $I_{0к1}$, проходящего по защищаемой линии при к. з. на подстанции B .

Ток срабатывания мгновенной направленной отсечки выбирается так, чтобы она не действовала при к. з. за шинами противоположной подстанции B (рис. 8-12, $a, б$). Для выполнения этого условия необходимо принять:

$$I_{с.з} = k_n 3I_{0расч}, \quad (8-16)$$

где k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным для реле типа ЭТ или РТ 1,2—1,3, а для реле типа РТ-80 и РТ-90 1,4—1,5; $I_{0расч}$ — наибольший ток I_0 , проходящий по защищаемой линии $Л1$, от которого должна быть отстроена отсечка.

Ток срабатывания мгновенных отсечек на параллельных линиях необходимо выбирать с учетом наличия значительной в з а и м о и н д у к ц и и от параллельной цепи, оказывающей существенное влияние на сопротивление нулевой последовательности [Л. 3, 33, 32].

При одинаковом направлении токов I_0 в обеих цепях взаимная индукция одной линии увеличивает сопротивление второй, а при различном — уменьшает его. В результате этого в первом случае токи I_0 в параллельных линиях уменьшаются, а во втором — увеличиваются.

Имея это в виду, максимальное значение тока I_0 в параллельных линиях при внешних к. з. определяют из рассмотрения трех расчетных схем (рис. 8-13, $a, б, в$).

При к. з. в точке K_1 на шинах противоположной подстанции возможны две схемы, показанные на рис. 8-13, a и $б$.

¹ Как было показано выше, мощность нулевой последовательности направлена от места повреждения к заземленным нейтралям сети.

Максимальный ток I_0 в линии получается в случае отключения одной из параллельных цепей и заземления ее с двух сторон (рис. 8-13, б).

В этом режиме сопротивление оставшейся в работе линии $Л1$ вследствие взаимоиндукции от тока I_{02} уменьшается, что влечет за собой увеличение расчетного тока I_{01} .

Третья расчетная схема приведена на рис. 8-13, в.

При определенных сочетаниях сопротивлений x_0 элементов рассматриваемой сети ток I_0 в линии $Л1$ может достигнуть максимального значения не в случае повреждения на шинах в точке K_1 ,

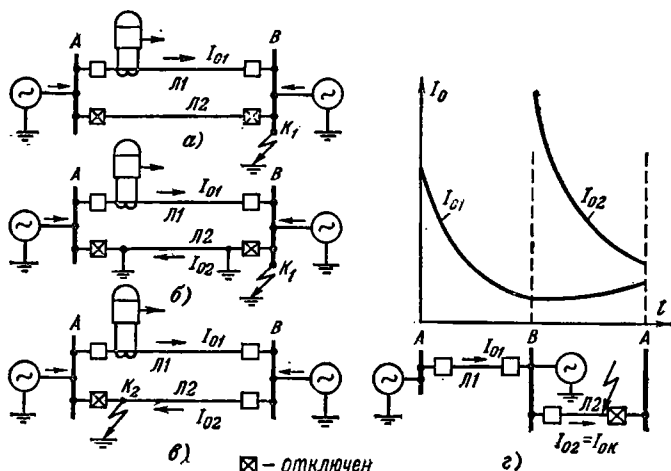


Рис. 8-13. Расчет токовой отсечки на параллельных линиях. Расчетные схемы для выбора тока срабатывания отсечек нулевой последовательности на параллельных линиях (а, б, в) и характер изменения тока I_{01} при к. з. односторонне отключенной параллельной линии $Л2$ (г).

а при к. з. на параллельной линии в точке K_2 , в режиме одностороннего отключения этой линии.

Хотя к. з. в точке K_2 является более удаленным, чем к. з. в K_1 , ток I_{01} в линии $Л1$ в этом случае может оказаться больше благодаря уменьшению сопротивления линии $Л1$, вызванного сильной взаимоиндукцией от линии $Л2$, направленного противоположно току I_{01} и I_{02} в зависимости от местоположения точки к. з. для схемы на рис. 8-13, в.

В качестве $I_{0\text{расч}}$ берется большее из полученных значений I_{01} . Токи нулевой последовательности необходимо рассчитывать при том виде к. з. на землю, при котором их значение получается наибольшим.

Из теории расчета токов к. з. [Л. 3] известно, что при равенстве суммарных сопротивлений прямой и обратной последовательностей схемы замещения $[x_{12} \leq x_{22}]$ ток $I_0' > I_0^{(1)}$, если $x_{02} > x_{12}$.

Подсчитав и сопоставив x_{02} с x_{12} , находят расчетный вид к. з. (однофазное или двухфазное к. з. на землю).

Ток срабатывания направленной отсечки с выдержкой времени отстраивается от тока $I_{0\text{расч}}$, появляющегося в реле при к. з. в конце зоны действия мгновенной защиты B (рис. 8-14, а), установленной на следующем участке $Л2$. Расчет ведется по выражению (8-16).

На рис. 8-14 показан графический способ определения величины $I_{0\text{расч}}$ для отсечки A с выдержкой времени t_A . Он сводится

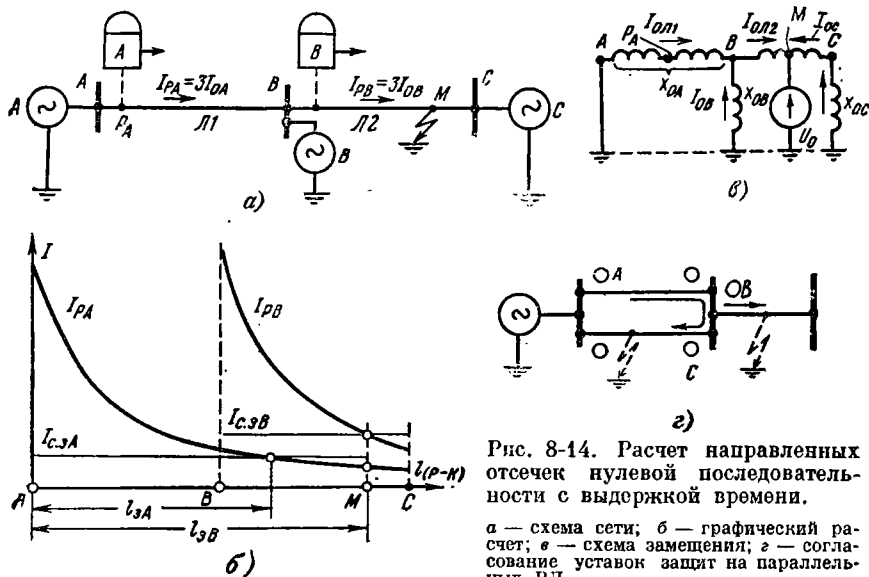


Рис. 8-14. Расчет направленных отсечек нулевой последовательности с выдержкой времени.

а — схема сети; б — графический расчет; в — схема замещения; г — согласование уставок защит на параллельных ВЛ.

к следующему. Строятся кривые I_{PA} и I_{PB} (рис. 8-14, б) изменения тока $3I_0$, проходящего в реле отсечек A и B при к. з. в разных точках линии $Л2$. По точке пересечения кривой I_{PB} с прямой $I_{c.3B}$ находится граница (точка M) зоны действия мгновенной отсечки B , установленной на $Л2$.

Для найденной точки M по кривой I_{PA} определяется значение тока $3I_{0M}$, проходящего через отсечку A при к. з. в конце зоны действия отсечки B . Полученный ток $3I_{0M}$ является расчетным током, от которого нужно отстроить отсечку A .

Подставляя найденный ток в выражение (8-16), находим $I_{c.3A}$, при котором отсечка A не работает за пределами зоны действия отсечки B .

Ток $I_{c.3A}$, удовлетворяющий этому условию, можно найти аналитически, определив коэффициент распределения токов I_0 в схеме нулевой последовательности рассматриваемого участка сети (рис. 8-14, а).

Из схемы замещения этого участка (рис. 8-14, в) следует, что при к. з. в любой точке линии Л2 отношение между токами $I_{0Л1}$ и $I_{0Л2}$ является постоянной величиной и равно:

$$\frac{I_{0Л1}}{I_{0Л2}} = \frac{x_{0В}}{x_{0А} + x_{0В}} = k_p.$$

Отсюда

$$I_{0Л1} = k_p I_{0Л2}. \quad (8-16a)$$

При к. з. в конце зоны отсечки В в условиях, когда последняя находится на грани действия, ток $I_{0Л2} = I_{с.зВ}$; подставив это в (8-16a), найдем, что в этом случае по отсечке А будет проходить ток $I_{Л1} = k_p I_{с.зВ}$.

Если принять $I_{с.зА} = k_p I_{с.зВ}$, то при токе $I_{0Л2} < I_{с.зВ}$ ток $I_{0Л1}$, проходящий по отсечке А, также будет меньше $I_{с.зА}$ и, следовательно, защита А не будет действовать за пределами зоны действия защиты В. С учетом этого принимается $I_{с.зА} = k_n k_p I_{с.зВ}$.

При выборе $I_{с.зА}$ отсечки с выдержкой времени на п а р а л л е л ь н ы х линиях для определения максимального значения $I_{орасч}$ необходимо исходить из расчетных схем, приведенных на рис. 8-13. В этом случае чувствительность отсечки А согласуется с мгновенной отсечкой В и С (рис. 8-14, г).

Выдержка времени t_A отсечки А принимается на ступень Δt больше времени действия отсечки В, а на параллельных линиях и отсечки С.

8-5. СТУПЕНЧАТАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Большое распространение в сетях с глухозаземленной нейтралью получила ступенчатая защита нулевой последовательности,

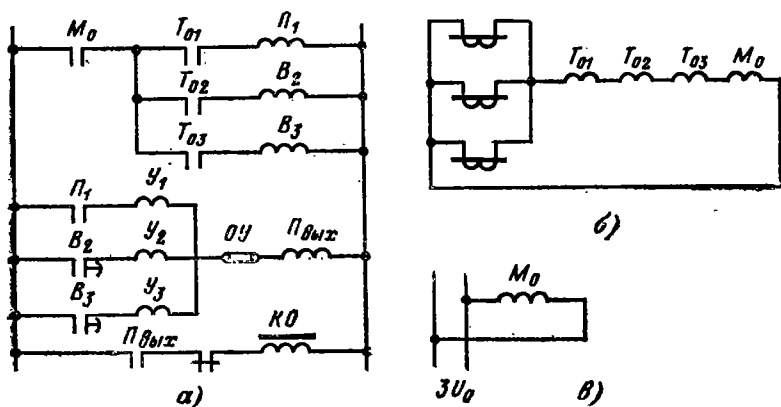


Рис. 8-15. Трехступенчатая направленная защита нулевой последовательности.

а — оперативные цепи; б — токовые цепи; в — цепи напряжения,

токовая и направленная. Наиболее полноценной является трехступенчатая защита, состоящая из мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и максимальной защиты нулевой последовательности.

Схема и характеристика такой трехступенчатой направленной защиты показаны на рис. 8-15 и 8-16.

Первая ступень защиты выполняется мгновенной с помощью пускового токового реле T_{01} . Вторая ступень

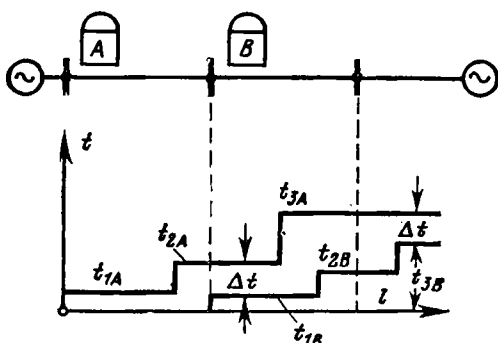


Рис. 8-16. Характеристика времени действия трехступенчатой защиты нулевой последовательности и согласование ее со смежной защитой B. t_{2A} с t_{1B} ; t_{3A} с t_{2B} и t_{3B} .

отстраивается от мгновенной отсечки следующего участка и имеет $t_{11} \approx 0,4 \div 0,6$ с; она осуществляется посредством пускового токового реле T_{02} и реле времени B_2 . Третья ступень предназначена для резервирования защиты следующего участка. Она выполняется с помощью токового реле T_{03} и реле времени B_3 .

Для отстройки первой ступени защиты от разрядников предусмотре-

но промежуточное реле P_1 с $t = 0,03 \div 0,06$ с. Реле мощности M_0 является общим для всех ступеней. В схеме имеется отключающее устройство ОУ для удобного вывода защиты из действия.

Выбор уставок каждой ступени защиты производится в полном соответствии с рассмотренным выше расчетом уставок для мгновенной отсечки, отсечки с выдержкой времени и максимальной защиты нулевой последовательности.

8-6. ПИТАНИЕ ПОЛЯРИЗУЮЩЕЙ ОБМОТКИ РЕЛЕ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ОТ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА

На рис. 8-17 изображена схема направленной защиты нулевой последовательности, не требующая трансформатора напряжения. В этой схеме поляризирующая обмотка (обмотка напряжения) реле мощности 2 питается от трансформатора тока 5, установленного в заземляющем проводе силового трансформатора 6.

При замыкании на землю ток нулевой последовательности I_{01} в заземляющем проводе, поступающий в поляризирующую обмотку реле мощности, всегда направлен в одну сторону. Направление же тока в защищаемой линии зависит от положения точки повреждения (рис. 8-18).

Ток I_{0K1} в месте установки защиты при к. з. на защищаемой линии в точке K_1 противоположен току I_{0K2} , проходящему через защиту при к. з.

в точке K_2 за шинами подстанции. Векторные диаграммы этих токов показаны на рис. 8-18, б. При повреждении на защищаемой линии угол φ_p (между токами $\dot{I}_{0T}$ и $\dot{I}_{0K1}$) равен 180° ; при этом контакты реле мощности должны замыкаться.

В случае к. з. на землю вне зоны $\varphi_p = 0$ и реле мощности не должно действовать. Отсюда следует, что при данной схеме включе-

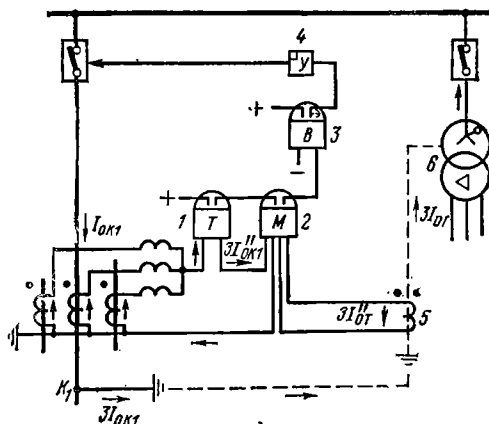


Рис. 8-17. Принципиальная схема максимальной защиты нулевой последовательности с питанием поляризирующей обмотки реле мощности от трансформатора тока.

ния поляризирующей обмотки реле необходимо применять реле косинусного или смешанного типа, надежно работающее при $\varphi_p = 180^\circ$. Для включения по такой схеме используется специальное реле типа РБМ-272, имеющее две токовые обмотки. Угол максимальной чувствительности этого реле $\varphi_{м.ч} = 0$. Освоено и выпускается промышленностью реле направления мощности с токовой поляризацией типа РМП-272 на выпрямленных токах. Рассмотренная схема применяется в тех случаях, когда на подстанции отсутствует трансформатор напряжения или когда его установка нецелесообразна.

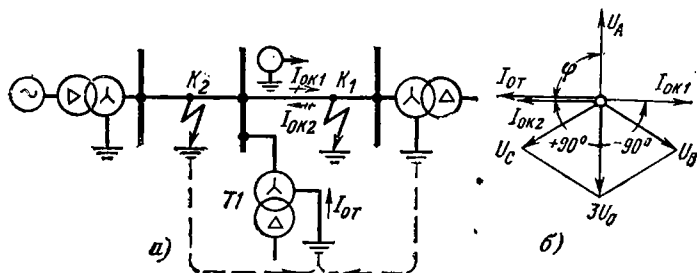


Рис. 8-18. Векторные диаграммы токов нулевой последовательности для реле мощности на рис. 8-17.

а — распределение токов I_0 ; б — векторная диаграмма при к. з. K_1 и K_2 . Поляризирующая обмотка реле питается током I_{0T} , а токовая — токами I_{0K1} и I_{0K2} . На диаграмме принято, что токи, направленные к шинам, на защищаемой линии и в трансформаторе имеют одинаковый знак,

8-7. ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЗАЩИТЫ

В энергосистемах Советского Союза защита нулевой последовательности получила весьма широкое распространение в сетях 110—500 кВ. Положительными качествами защиты являются простота схемы и высокая надежность, что подтверждается опытом эксплуатации.

Пусковой орган защиты нулевой последовательности имеет высокую чувствительность, поскольку его не нужно отстраивать от токов нагрузки.

В благоприятных условиях работает и орган направления мощности защиты. При наиболее тяжелых к. з. вблизи шин подстанций и электростанций реле мощности нулевой последовательности получает большое напряжение U_0 и поэтому работает в отличие от реле мощности, включаемых на фазный ток, очень надежно. Угол сдвига φ_p между U_p и I_p , подводимых к реле мощности нулевой последовательности, всегда близок к оптимальному, вследствие чего реле работает в условиях наибольшей чувствительности.

Благодаря наличию трансформаторов с заземленными нейтральными на каждой подстанции сети 110—500 кВ, являющихся источником тока нулевой последовательности, имеется широкая возможность применения отсечек нулевой последовательности, а вместе с тем и многоступенчатых защит нулевой последовательности практически на всех линиях средней и большой протяженности.

К недостаткам, свойственным принципу действия защиты, следует отнести то, что она реагирует на токи в неполнофазном режиме и может работать ложно при обрыве фазного провода во вторичной цепи трансформаторов тока.

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ

ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ С МАЛЫМ ТОКОМ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ¹

9-1. ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ОДНОФАЗНОМ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ

Сети с малым током замыкания на землю работают с изолированной нейтралью или с заземленной через дугогасящую катушку (ДГК).

Как уже отмечалось в § 1-2, в таких сетях (в отличие от сетей с глухозаземленной нейтралью) замыкание на землю одной фазы не вызывает короткого замыкания и не сопровож-

¹ В СССР с малыми токами замыкания на землю работают сети с напряжением 35 кВ и ниже.

дается поэтому снижением междофазных напряжений и появлением повышенных токов в сети.

Рассмотрим характер изменения токов и напряжений в сети и их векторные диаграммы при однофазных замыканиях на землю (рис. 9-1), принимая для упрощения, что нагрузка сети отключена.

В нормальных условиях напряжения проводов A , B и C по отношению к земле равны соответствующим фазным напряжениям $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, которые в свою очередь равны э. д. с. источника питания $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$, $\dot{E}_C$, поскольку нагрузка отключена. Векторы этих фазных напряжений образуют симметричную звезду (рис. 9-2, а), а их сумма равна нулю, в результате чего напряжения в нейтрали H отсутствуют: $U_H = 0$.

Под действием фазных напряжений через емкости фаз относительно земли C_A , C_B и C_C проходят токи, опережающие напряжения на 90° :

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\dot{U}_A}{-jx_C}; & \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B}{-jx_C}; \\ \dot{I}_C &= \frac{\dot{U}_C}{-jx_C}. \end{aligned} \quad (9-1)$$

Сумма емкостных токов, проходящих по фазам в нормальном режиме, равна нулю, и поэтому I_0 отсутствует (см. рис. 9-2, а).

Напряжения сети при замыкании на землю. При металлическом замыкании на землю одной фазы, например A , ее напряжение относительно земли снижается до нуля ($U_A = 0$), так как в результате соединения с землей точка K приобретает потенциал, равный нулю (потенциал земли).

Напряжение нейтрали U_H по отношению к земле становится равным напряжению между точками K и H (рис. 9-1 и 9-2, б), т. е. напряжению, равному по величине и обратному по знаку э. д. с. заземлившейся фазы:

$$\dot{U}_H = \dot{U}_{KH} = -\dot{E}_A. \quad (9-2)$$

Напряжение неповрежденных фаз B и C относительно земли повышается до междофазного. Действительно, на рис. 9-1 видно, что напряжение фазы B относительно земли равно напряжению между проводом B и точкой K , следовательно, $\dot{U}'_B = \dot{U}_{BA}$.

Аналогично напряжение фазы C по отношению к земле $\dot{U}'_C = \dot{U}_{CA}$.

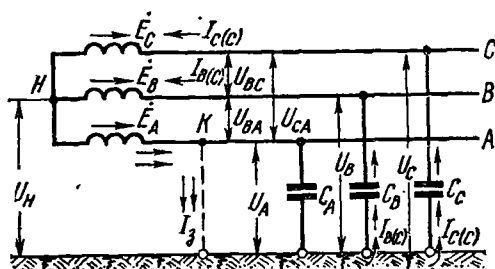


Рис. 9-1. Токи и напряжения при замыкании на землю одной фазы в сети с изолированной нейтралью.

Учитывая, что нейтраль H имеет относительно земли напряжение U_H , можно (исходя из рис. 9-1) выразить напряжения $\dot{U}'_B$ и $\dot{U}'_C$ через $\dot{U}'_H$:

$$\dot{U}'_B = \dot{U}'_H + \dot{E}_B \text{ и } \dot{U}'_C = \dot{U}'_H + \dot{E}_C$$

или с учетом (9-2):

$$\dot{U}'_B = -\dot{E}_A + \dot{E}_B = \dot{U}_{BA} \text{ и } \dot{U}'_C = -\dot{E}_A + \dot{E}_C = \dot{U}_{CA}. \quad (9-2a)$$

Междуфазные напряжения между проводами фаз остаются неизменными, что также следует из рассмотрения рис. 9-1.

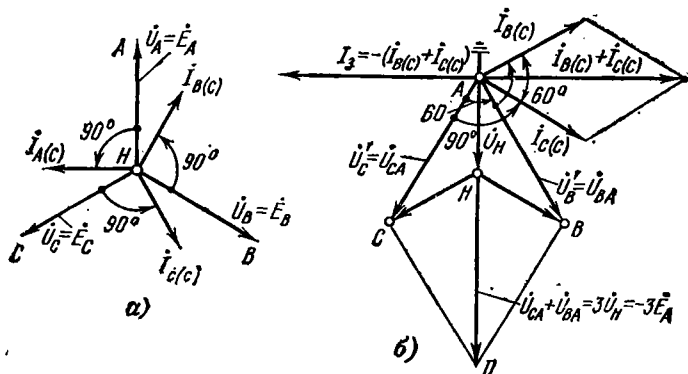


Рис. 9-2. Векторные диаграммы токов и напряжений в сети с изолированной нейтралью.

a — в нормальном режиме; b — при замыкании на землю фазы A .

На основе полученных выражений на рис. 9-2, b построена (топографическая) векторная диаграмма напряжений проводов и нейтрали сети по отношению к земле ($\dot{U}'_A$, $\dot{U}'_B$, $\dot{U}'_C$ и $\dot{U}'_H$). На этой диаграмме точки A , B и C представляют собой провода линии, а точка H соответствует нейтрали источника питания. Точка A связана с землей и имеет нулевой потенциал.

Токи при замыкании на землю. В месте повреждения K проходят токи, замыкающиеся через емкости фаз сети (рис. 9-1).

Поскольку $U_A = 0$, то $I_{A(C)} = 0$. В двух других фазах под действием напряжения U'_B и U'_C появляются токи, опережающие на 90° напряжения:

$$I_{B(C)} = j \frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} \text{ и } I_{C(C)} = j \frac{\dot{U}_{CA}}{x_C}. \quad (9-3)$$

Ток I_3 в месте повреждения равен геометрической сумме токов в фазах B и C и противоположен им по фазе, что видно из токораспределения на рис. 9-1:

$$I_3 = -(I_{B(C)} + I_{C(C)}).$$

С учетом (9-3)

$$\dot{I}_3 = -j \left(\frac{\dot{U}_{BA}}{x_C} + \frac{\dot{U}_{CA}}{x_C} \right).$$

Из диаграммы на рис. 9-2, б следует, что $\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A$, с учетом этого

$$\dot{I}_3 = j \frac{3\dot{E}_A}{x_C} = j \frac{3\dot{U}_\Phi}{x_C}. \quad (9-4)$$

Таким образом, ток I_3 равен утроенному значению нормального емкостного тока фазы ($I_{C\Phi} = U_\Phi/x_C$). Из рис. 9-2, б видно, что ток I_3 отстает от напряжения U_H на 90° .

Ток I_3 зависит от напряжения сети и емкости фаз ($x_C = 1/\omega C$) и может быть подсчитан по формуле

$$I_3 = 3I_{C\Phi} = 3 \frac{U_\Phi}{x_C} = 3U_\Phi \omega C_{уд} l \cdot 10^{-6},$$

где l — общая протяженность одной фазы сети; $C_{уд}$ — емкость 1 км фазы сети относительно земли.

Емкость фаз относительно земли в воздушных сетях значительно меньше, чем в кабельных.

Токи и напряжения нулевой последовательности, возникающие при замыканиях на землю. Вследствие нарушения симметрии и баланса емкостных токов и фазных напряжений появляются составляющие нулевой последовательности:

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3} (\dot{U}'_A + \dot{U}'_B + \dot{U}'_C); \quad (9-5)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C). \quad (9-6)$$

Подставляя в (9-5) значения напряжений из (9-2а) и учитывая, что $U_A = 0$, получаем:

$$\dot{U}_{0к} = \frac{1}{3} (\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA}); \quad (9-6а)$$

и так как $\dot{U}_{BA} + \dot{U}_{CA} = -3\dot{E}_A = 3\dot{U}_H$, то $\dot{U}_{0к} = -\dot{E}_A = \dot{U}_H$.

Таким образом, напряжение нулевой последовательности равно и противоположно нормальному напряжению E_A поврежденной фазы и равно напряжению U_H в нейтрали сети. Пренебрегая сопротивлением проводов, которое значительно меньше x_C , получаем, что во всех точках сети $U_0 = U_{0к}$.

Токи I_0 , возникающие под действием $U_{0к}$, замыкаются через емкость фаз и заземленные нулевые точки генераторов и трансформаторов, если такие заземления имеются (рис. 9-3).

Из распределения токов I_0 , показанного на рис. 9-3, следует, что

$$I_0 = -j \frac{\dot{U}_{0K}}{x_C} = -j \frac{\dot{E}_A}{x_C} = -j \frac{U_\Phi}{x_C}, \quad (9-7)$$

где U_Φ — нормальное напряжение поврежденной фазы.

Знак минус в выражении (9-7) учитывает, что за положительное направление токов и напряжений принято направление от источника питания к месту повреждения. С учетом (9-4) ток замыкания на землю в месте повреждения

$$I_a = 3I_0. \quad (9-8)$$

Токи I_0 и I_a совпадают по фазе и отстают от вектора напряжения U_{0K} на 90° .

Ток I_0 в обмотках генератора отсутствует, поскольку нулевая точка генератора изолирована и сумма токов, проходящих в фазах генератора, равна нулю.

Замыкание на землю через переходное сопротивление (рис. 9-4). Напряжение поврежденной фазы $\dot{U}_A = \dot{I}_a r_\Pi = U_K$, а напряжение в нулевой точке $\dot{U}_N = -\dot{E}_A + \dot{U}_K$, т. е. оно оказывается меньшим, чем при металлическом замыкании. Соответственно уменьшаются напряжения неповрежденных фаз относительно земли, а также токи I_0

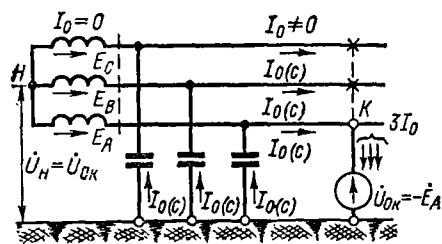


Рис. 9-3. Прохождение токов нулевой последовательности при замыкании на землю.

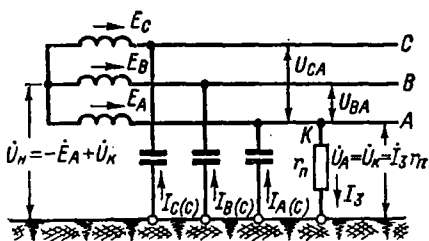


Рис. 9-4. Однофазное замыкание на землю через переходное сопротивление r_Π .

и I_a . В емкости поврежденной фазы появляется ток $I_A = U_K / -jx_C$.

В расчетах снижение тока и напряжения нулевой последовательности, обусловленное сопротивлением r_Π , учитывается коэффициентом полноты замыкания

$$\beta = \frac{U_{0K}}{U_\Phi},$$

где U_Φ — нормальное значение напряжения поврежденной фазы.

При металлическом замыкании $\beta = 1$, так как $U_{0K} = U_\Phi$; при неполном заземлении на землю $U_{0K} = \beta U_\Phi$, ток $I_0 = \beta U_\Phi / x_C$, а ток

$$I_a = 3I_0 = 3 \frac{\beta U_\Phi}{x_C}. \quad (9-9)$$

Поскольку защиты от замыканий на землю реагируют на составляющие тока и напряжения нулевой последовательности,

то для анализа их работы весьма удобно пользоваться токораспределением не фазных, а нулевых токов, а для вычисления значения $U_{0к}$, I_0 и I_3 применять формулы (9-5), (9-6), (9-8) и (9-9).

Компенсированная сеть [Л. 36]. Рассмотрим сеть (рис. 9-5, а), нулевая точка которой заземлена через дугогасящую катушку ДГК, предназначенную для компенсации емкостных токов в месте повреждения.

При замыкании на землю напряжения во всех точках такой сети имеют те же значения, что и в сети с изолированной нулевой точкой.

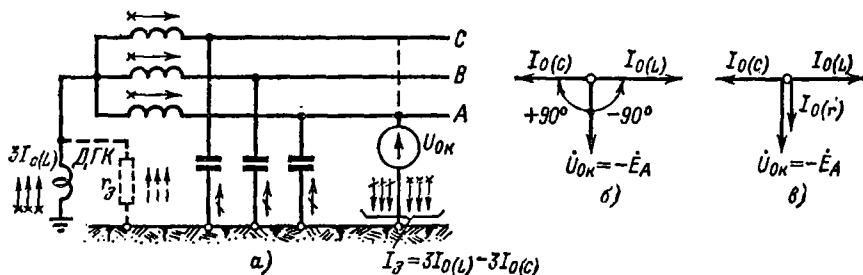


Рис. 9-5. Однофазное замыкание на землю в компенсированной сети.

а — прохождение токов нулевой последовательности; б и в — векторные диаграммы в месте повреждения.

Под влиянием напряжения нулевой последовательности $U_{0к}$, возникающего в месте повреждения, кроме токов $I_{0с}$, замыкающихся через емкости C фаз, в каждой фазе появляется ток $I_{0(L)} = U_{0к}/jx_L$, замыкающийся через дугогасящую катушку.

Ток $I_{0(L)}$ опережает напряжение $U_{0к}$ на 90° , ток же $I_{0(C)}$ отстает от $U_{0к}$ на 90° . Следовательно, фазы токов $I_{0(L)}$ и $I_{0(C)}$ противоположны (рис. 9-5, б), и поэтому ток I_3 в месте повреждения равен их разности:

$$I_3 = 3(I_{0(L)} - I_{0(C)}). \quad (9-10)$$

При полной компенсации $I_{0(L)} - I_{0(C)} = 0$. Иногда параллельно дугогасящей катушке включается активное сопротивление r_3 (показанное пунктиром на рис. 9-5). Тогда, кроме токов $I_{0(C)}$ и $I_{0(L)}$, появляется третий ток $I_{0(r)} = U_{0к}/r_3$, совпадающий по фазе с $U_{0к}$ и сдвинутый на 90° по отношению к токам $I_{0с}$ и I_{0L} . Таким образом, при наличии сопротивления r_3 ток в месте повреждения:

$$I_3 = \sqrt{(3I_{0(L)} - 3I_{0(C)})^2 + (3I_{0(r)})^2}. \quad (9-11)$$

9-2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ

Требования к защите от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю существенно отличаются от требований, предъявляемых к защитам от к. з.

Поскольку замыкания на землю не вызывают появления сверхтоков и не искажают величины междуфазных напряжений, они не отражаются на питании потребителей, не влияют на устойчивость энергосистемы и не сопровождаются перегрузкой оборудования опасными токами. Поэтому в отличие от к. з. замыкания на землю не требуют немедленной ликвидации.

Однако отключение замыканий на землю является все же необходимым, так как в результате теплового воздействия тока замыкания на землю в месте повреждения возможно повреждение изоляции между фазами и переход однофазного замыкания в междуфазное к. з. Помимо того, из-за перенапряжений, вызываемых замыканием на землю, возможен пробой или перекрытие изоляции на неповрежденных фазах, что приводит к образованию двойных замыканий на землю в разных точках сети.

Как показывает опыт, в компенсированных сетях и сетях с малыми емкостными токами (20—30 А в сети 10 и 6 кВ) замыкания на землю могут оставаться довольно длительное время (до 2 ч), не вызывая развития повреждения и не нарушая работы потребителей.

Исходя из этого в СССР принято выполнять защиту от замыканий на землю в сетях с малым током повреждения с действием на сигнал.

Получив сигнал о появлении замыкания на землю, дежурный персонал принимает меры к переводу нагрузки поврежденной линии на другой источник питания, разгружает поврежденную линию и затем отключает ее.

Защиты от замыкания на землю должны быть селективными и иметь высокую чувствительность. Последнее вызывается тем, что токи повреждения, на которые реагирует защита, очень малы (5—10 А).

Кроме того, желательно, чтобы защита от замыканий на землю реагировала не только на устойчивые, но также и на неустойчивые повреждения.

Особые требования предъявляются к защите от замыканий на землю в сетях, питающих электродвигатели торфоразработок и передвижных установок. Здесь представляет опасность переход замыкания на землю одной фазы в двойное замыкание. При двойном замыкании на землю «шаговое напряжение» и «напряжение прикосновения» достигает значений, опасных для людей, обслуживающих установки. Поэтому для безопасности персонала, ведущего добычу торфа, защита от замыкания на землю в таких сетях должна при появлении «земли» немедленно отключить поврежденный участок. Эти защиты должны отличаться особенно высокой чувствительностью, так как емкостные токи в сетях, питающих торфоразработки, обычно имеют величину около 0,5—1 А.

Замыкания на землю в воздушных сетях особенно в населенных районах также целесообразно отключать от защиты для обеспечения безопасности населения.

9-3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ

Простейшей защитой от замыканий на землю является общая не селективная сигнализация о появлении замыкания на землю без указания поврежденного участка.

Такое устройство состоит из трех реле минимального напряжения (рис. 9-6, а), включенных на напряжение фаз относительно земли, или схемы с одним реле повышения напряжения (рис. 9-6, б), включенным на напряжение нулевой последовательности.

При появлении «земли» схемы дают сигнал, а затем дежурный поочередным отключением присоединений определяет поврежденный элемент. Указанный способ определения повреждения связан с кратковременным нарушением питания потребителей, требует

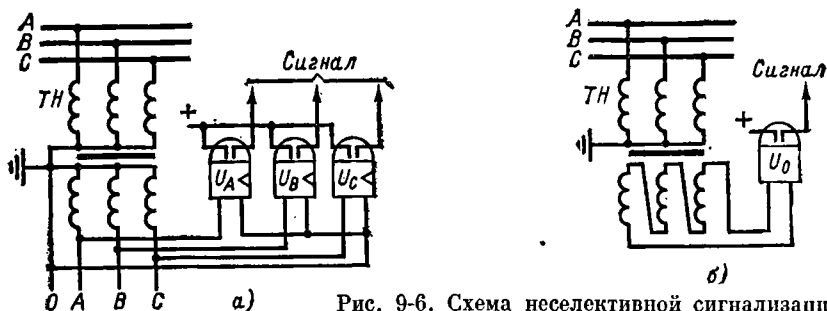


Рис. 9-6. Схема неселективной сигнализации при замыканиях на землю.

а — с реле минимального напряжения, включенными не на фазные напряжения; б — с реле напряжения, включенным на напряжение нулевой последовательности.

много времени и особенно неудобен на подстанциях без постоянного дежурного персонала. В связи с этим неселективную сигнализацию необходимо дополнять селективной защитой от замыканий на землю. В качестве селективных защит от замыканий на землю, указывающих поврежденный участок, применяются токовые и направленные защиты, реагирующие на токи и мощность нулевой последовательности [Л. 38].

Для обеспечения селективной работы защиты используется различие в величине и направлении токов, появляющихся при замыканиях на землю на поврежденном и неповрежденном присоединениях. Реагируя на это различие, защита должна действовать только на поврежденном присоединении и не работать на неповрежденных присоединениях.

Однако токи, возникающие при замыканиях на землю на поврежденных и неповрежденных элементах, особенно в компенсированной сети, обладают недостаточно четкими и устойчивыми различиями, в связи с чем создание селективной защиты от замыканий на землю является сложной задачей, пока еще не имеющей полноценного и подтвержденного эксплуатацией решения.

В некомпенсированных сетях наиболее простым решением является применение токовых защит, реагирующих на емкостный ток сети $I_{0с}$. Но это оказывается возможным только при большом числе присоединений, когда суммарный емкостный ток сети во много раз превосходит емкостный ток каждого присоединения (см. § 9-5), так как только при этом условии можно обеспечить требуемую селективность защиты.

В компенсированных сетях емкостный ток основной частоты (50 Гц) компенсируется током дугогасящей катушки.

В связи с этим для действия защиты в компенсированной сети приходится создавать ток искусственным путем или использовать остаточные (естественные) некомпенсированные токи (например, активные и неосновных гармоник) или применять защиты, реагирующие на токи и напряжения, возникающие в переходном режиме в первый момент повреждения.

Все известные и применяемые на практике защиты можно подразделить на четыре группы:

1) защиты, реагирующие на естественный емкостный ток сети. Такой способ защиты возможен только при отсутствии компенсации или при наличии недокомпенсации емкостного тока сети;

2) защиты, реагирующие на токи нулевой последовательности, создаваемые искусственным путем;

3) защиты, реагирующие на установившиеся остаточные токи, возникающие в поврежденной линии при резонансной компенсации емкостных токов;

4) защиты, реагирующие на токи переходного режима, возникающие в первый момент замыкания на землю.

Ниже в краткой форме рассматриваются основные разновидности защиты каждой из этих групп.

9-4. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ЕМКОСТНЫЙ ТОК СЕТИ И НА ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫЕ ТОКИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

а) Способы получения искусственного тока

На практике применяются следующие способы получения тока нулевой последовательности искусственным путем:

Первым способом получения тока, необходимого для действия защиты, является включение активного сопротивления параллельно дугогасящей катушке (рис. 9-5) с последующим его автоматическим отключением. При этом появляется активный ток, который проходит по поврежденной линии к месту замыкания и используется для действия защиты. В неповрежденных линиях активный ток определяется активными потерями данной линии и практически очень мал. Этот способ требует высоковольтного сопротивления и вспомогательной аппаратуры, появление актив-

ного тока в месте замыкания на землю ухудшает условия гашения дуги и способствует развитию повреждения. В связи с указанными недостатками в СССР активный ток для выполнения защиты не используется. За рубежом этот способ применяется.

Вторым способом создания искусственного тока является работа с постоянной перекомпенсацией, при которой ток ДГК выбирается больше емкостного тока сети.

Избыточный ток $3I_{0L} - 3I_{0C}$ имеет индуктивный характер и используется для действия защиты. Величина избыточного тока ограничивается по условию гашения дуги и предупреждения развития повреждения. Для сети 6-10 кВ избыточный ток не должен превышать 25—15 А.

Расстройка компенсации, хотя бы и в ограниченных пределах, ухудшает условия работы сети и поэтому не является желательным способом.

Третьим способом создания тока для действия защиты является наложение на ток повреждения тока не промышленной частоты (например, 100 или 25 Гц), подаваемого от специального источника в цепь ДГК. Этот ток замыкается по тому же контуру, что и ток дугогасящей катушки. На появление этого тока реагирует защита.

Частота 100 или 25 Гц выбрана на основе имеющихся данных о том, что эти гармоники в естественном емкостном токе отсутствуют. На этом основана селективность защиты, исключаяющая работу защиты на всех присоединениях, кроме поврежденного. При высокой чувствительности защиты для ее действия достаточен ток примерно 3—5 А. Такой ток не ухудшает условий компенсации, и поэтому *данный способ может иметь широкое применение, если опыт эксплуатации подтвердит надежность положенного в основу его принципа селективности.*

б) Токовая защита, реагирующая на полный ток нулевой последовательности

Защита предназначена для радиальных сетей. В некомпенсированной сети она реагирует на естественный емкостный ток, а в компенсированной действует от остаточного тока перекомпенсации (если таковая предусмотрена). Основной трудностью в выполнении рассматриваемой защиты является обеспечение необходимой чувствительности при малых значениях тока повреждения — 10 А и меньше.

На рис. 9-7 показаны два варианта защиты, различающиеся своей чувствительностью. Реагирующий орган защиты состоит из токового реле 1, питающегося через фильтр нулевой последовательности. В схеме рис. 9-7, а используется трехтрансформаторный фильтр, рассмотренный в § 3-4. В схеме рис. 9-7, б в качестве фильтра применен специальный трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП) особой конструкции.

В трехтрансформаторном фильтре ток $3I_0$ получается суммированием вторичных токов трех фаз: $3I_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c$.

В однотрансформаторном фильтре, выполняемом с помощью трансформатора тока нулевой последовательности (рис. 9-7, б и 9-8), ток $3I_0$ получается магнитным суммированием первичных токов трех фаз:

$$3I_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Указанное принципиальное различие в способе суммирования токов трех фаз (вторичных в одном случае и первичных в другом) порождает существенные различия в чувствительности защит с фильтрами I_0 первого и второго типа.

Защита с трехтрансформаторным фильтром имеет ряд недостатков, снижающих ее чувствительность.

1. Коэффициент трансформации трансформаторов тока фильтра, выбираемый по нагрузке линии, получается большим, след-

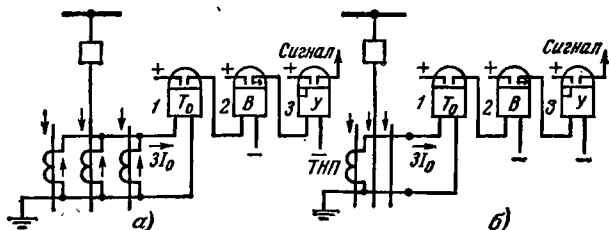


Рис. 9-7. Схема селективной сигнализации.

а — с трехтрансформаторным фильтром I_0 ; б — с трансформатором тока нулевой последовательности (ТНП).

ствие чего вторичные токи при замыкании на землю имеют весьма малую величину. Так, например, если по току нагрузки коэффициент трансформации трансформаторов тока $n_T = 800/5$, то при реальном значении тока замыкания на землю 20 А вторичный ток трансформаторов тока будет равен 0,124 А, т. е. очень мал.

2. Токовые реле, реагирующие на столь малые токи, имеют большое число витков и значительное сопротивление (примерно 30—40 Ом). Такое сопротивление реле соизмеримо с сопротивлением намагничивания трансформаторов тока $z'_{\text{нам}}$ (рис. 3-1, б).

Вследствие этого значительная часть тока повреждения отсасывается в трансформаторы тока неповрежденных фаз и теряется на намагничивание трансформатора тока поврежденной фазы, при этом в реле попадает лишь 50—60 % вторичного тока замыкания на землю (в приведенном примере ток составляет только 0,06 А).

3. Токовое реле I не должно действовать от токов небаланса, возникающих при нагрузке и междофазных к. з., для чего принимается $I_{c.з} > I_{\text{нб}}$. В трехтрансформаторном фильтре ток небаланса согласно (8-7) равен сумме намагничивающих токов трансформаторов тока, образующих фильтр (§ 8-2), и имеет

величину, соизмеримую с величиной вторичного тока повреждения.

Совокупность указанных причин и обуславливает относительно низкую чувствительность защиты от замыканий на землю, выполненной с помощью трехтрансформаторного фильтра. Первичный ток срабатывания такой защиты получается не меньше 20—25 А.

Защита с трансформатором тока нулевой последовательности получается значительно чувствительнее.

Главное преимущество ТНП состоит в значительно меньшем небалансе и возможности подбора числа витков вторичной обмотки из условия наибольшей чувствительности защиты без каких-либо ограничений по нагрузке. В результате этого ТНП позволяет обеспечить действие защиты при первичных токах порядка 3—5 А, а при сочетании ТНП с высокочувствительными реле чувствительность защиты повышается до 1—2 А.

Вследствие этого схема защиты с ТНП (рис. 9-7, б) является основой для сети с малым током замыкания на землю.

Схема с трехтрансформаторным фильтром находит применение в воздушных сетях 35 кВ, для которых ТНП еще не получило распространения.

Опыт эксплуатации показал, что *токовое реле 1 может неправильно работать на неповрежденных линиях в первый момент повреждения под влиянием бросков токов, появляющихся в неуставившемся режиме.*

Исключить ложную работу защиты по указанной причине можно загроблением защиты по току срабатывания, введением выдержки времени или применением фильтра, не пропускающего в реле тока высших частот, составляющих значительную долю в токе неуставившегося режима. В схемах на рис. 9-7 для отстройки от броска емкостного тока предусмотрено реле времени 2. Схемы с включением реле через фильтр высокой частоты также применяются. Защита с фильтром выполняется без выдержки времени и поэтому может реагировать на кратковременные замыкания на землю.

Действие защиты фиксируется с помощью указательного реле 3.

в) Принцип работы и устройство ТНП

Устройство ТНП приведено на рис. 9-8. Магнитопровод 1, собранный из листов трансформаторной стали, имеет обычно форму кольца или прямоугольника, охватывающего все три фазы защищаемой линии. Провода фаз А, В и С, проходящие через отверстие ТНП, являются первичной обмоткой трансформатора, вторичная обмотка 2 располагается на магнитопроводе.

Токи фаз I_A , I_B и I_C создают в магнитопроводе соответствующие магнитные потоки Φ_A , Φ_B и Φ_C ; складываясь, они образуют результирующий поток первичной обмотки:

$$\dot{\Phi}_{\text{рез}} = \dot{\Phi}_A + \dot{\Phi}_B + \dot{\Phi}_C. \quad (9-12)$$

Если поток $\Phi_{\text{рез}} \neq 0$, то во вторичной обмотке появляется э. д. с. E_2 , обуславливающая ток в реле. Каждый магнитный поток в выражении (9-12) связан с создающим его током I уравнением

$$\Phi = \frac{wI}{R_M} = kI. \quad (9-13)$$

При одинаковом расположении проводов фаз относительно магнитопровода и вторичной обмотки коэффициент k может считаться одинаковым для всех фаз. Тогда

$$\Phi_{\text{рез}} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = k(I_A + I_B + I_C). \quad (9-14)$$

Так как сумма токов фаз $I_A + I_B + I_C = 3I_0$, то можно сказать, что результирующий поток, создаваемый первичными токами ТНП, пропорционален составляющей тока нулевой последовательности:

$$\Phi_{\text{рез}} = k3I_0. \quad (9-15)$$

Поток $\Phi_{\text{рез}}$, а следовательно, вторичная э. д. с. E_2 и вторичный ток I_2 могут возникнуть только при условии, что сумма токов фаз

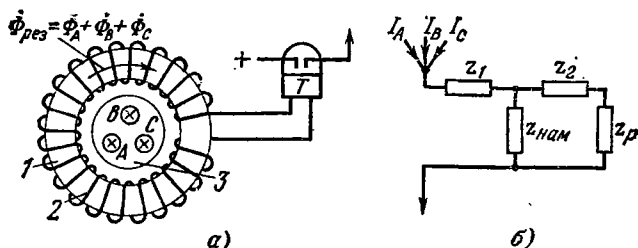


Рис. 9-8. Трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП).

а — устройство; *б* — схема замещения; 1 — магнитопровод; 2 — обмотка; 3 — трехфазный силовой кабель.

не равна нулю, или, иначе говоря, когда фазные токи, проходящие через ТНП, содержат составляющую I_0 . Поэтому ток в реле T , питающемся от ТНП, будет появляться только при замыканиях на землю.

В режиме нагрузки, трехфазного и двухфазного к. з. (без замыкания на землю) сумма токов фаз $I_A + I_B + I_C = 0$, и поэтому ток в реле отсутствует.

Однако практически расположение проводов фаз относительно вторичной обмотки неодинаково. Коэффициент взаимоиנדукции фаз со вторичной обмоткой k имеет различную величину, вследствие чего, несмотря на полный баланс первичных токов, сумма их магнитных потоков не равна нулю. Появляется поток небаланса, вызывающий во вторичной обмотке э. д. с. и ток небаланса.

Ток небаланса ТНП значительно меньше, чем в трехтрансформаторном фильтре; это объясняется тем, что в последнем суммируются вторичные токи, которые искажены погрешностью трансформации ($I_{\text{нам}}$), особенно проявляющейся при насыщении стали, в то время как в ТНП трансформация тока не влияет на небаланс. В ТНП суммируются магнитные потоки, и ток $I_{\text{нб}}$ зависит только от несимметрии расположения фаз первичного тока.

Для получения максимальной чувствительности защиты, питающейся от ТНП, сопротивление обмотки реле должно равняться сопротивлению ТНП. Пренебрегая сопротивлением вторичной обмотки z_2 (рис. 9-8, б), можно выразить указанное условие равенством

$$z_p = z_{\text{нам}}. \quad (9-16)$$

Из эквивалентной схемы ТНП (рис. 9-8, б) видно, что при выполнении условия (9-16) вторичный ток, поступающий в реле, и ток намагничивания оказываются одинаковыми: $I_{\text{нам}} = I_p$. Отсюда следует, что погрешность ТНП достигает примерно 50%. При столь большой погрешности нельзя вычислять вторичный ток по первичному, пользуясь коэффициентом трансформации $n_T = w_2/w_1$.

Для защиты линий ТНП выполняются пока только кабельного типа. При необходимости осуществления защиты воздушных линий делается кабельная вставка, на которой устанавливается ТНП.

Для кабельных линий заводы электропромышленности изготавливают ТНП типа ТЗ с неразъемным магнитопроводом, надеваемым на кабель до монтажа воронки, и типов ТЗР и ТФ с разъемным магнитопроводом, которые можно устанавливать на кабелях, находящихся в эксплуатации, без снятия кабельной воронки.

При прохождении токов $I_{\text{бр}}$ по оболочке неповрежденного кабеля, охваченного ТНП, в реле защиты появляется ток, от которого защита может действовать неправильно (рис. 9-9). Опыт эксплуатации показывает, что через оболочку кабелей (стальную броню и свинец) могут проходить токи $I_{\text{бр}}$, замыкающиеся через землю. Эти токи появляются при замыканиях на землю вблизи кабеля, работе сварочных аппаратов и в других подобных случаях. Прохождение тока $I_{\text{бр}}$ по броне неповрежденного кабеля через ТНП вызывает вторичный ток в его обмотке и, как следствие этого, неправильное действие защиты.

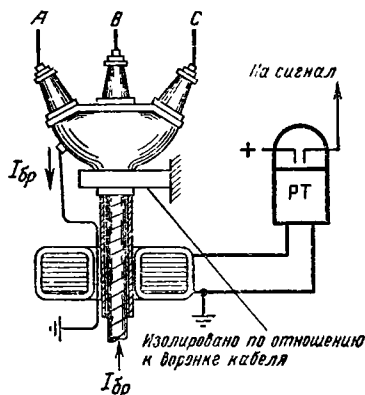


Рис. 9-9. Установка ТНП на кабеле.

Для исключения этого необходимо компенсировать влияние токов, которые могут проходить по свинцовой оболочке и броне кабеля. С этой целью броня и оболочка кабеля на участке от его воронки до ТНП изолируются от земли (рис. 9-9). Заземляющий провод присоединяется к воронке кабеля и пропускается через окно ТНП. При таком исполнении ток, проходящий по броне кабеля, возвращается по заземляющему проводу, поэтому магнитные потоки в магнитопроводе ТНП от токов в броне и проводе взаимно уничтожаются. Магнитопровод ТНП должен быть также надежно изолирован от брони кабеля.

г) Размещение защит в сети

Для определения поврежденного участка в радиальных сетях (рис. 9-10) токовые защиты устанавливаются на всех линиях каждого радиального направления А и Б. Защита устанавливается в начале каждой линии. При возникновении замыкания на землю (в точке К) по действию защиты на питающей подстанции определяется

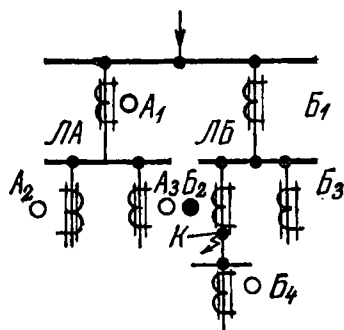


Рис. 9-10. Действие защиты в сети при замыкании на землю.

● — сработавшая защита; ○ — не действовавшая защита.

то радиальное направление, на котором произошло повреждение. Затем осмотром сигналов защит на линиях этого направления устанавливается поврежденный участок. Поврежденным является тот участок, на котором действовавшая защита является последней (Б₂). Если защиты действуют на отключение, то для обеспечения селективности время действия на них

подбирается по ступенчатому принципу, как на максимальных защитах.

д) Распределение токов нулевой последовательности в сети при замыкании на землю

Для уяснения условий работы защиты на рис. 9-11 приведено распределение токов I_0 . При замыкании на землю одной из фаз линии Л1 (например, в точке К) в месте повреждения возникает напряжение нулевой последовательности $U_{0к}$, под действием которого проходят токи нулевой последовательности I_0 , замыкающиеся через емкости фаз каждой линии и ДГК (если последняя установлена). Из рассмотрения приведенного токораспределения можно сделать следующие выводы:

1) Емкостный ток нулевой последовательности проходит по всем поврежденным и неповрежденным линиям сети. Ток дугогасящей катушки замыкается только по поврежденной линии Л1.

2) В неповрежденных линиях Л2 и Л3 через ТНП защиты проходит емкостный ток нулевой последовательности ($3I_{0Л2}$ и $3I_{0Л3}$), замыкающейся через емкости фаз данной линии $C_{Л2}$ и $C_{Л3}$. Эти токи направлены к шинам, а их величины равны:

$$3I_{0Л2} = 3U_{0К} \omega C_{Л2} \quad \text{и} \quad 3I_{0Л3} = 3U_{0К} \omega C_{Л3}. \quad (9-17)$$

3) Емкостный ток, проходящий через ТНП поврежденной линии Л1, $I_{ТНП \text{ пов. л.}}$, равен сумме емкостных токов всех неповрежденных линий или, иначе говоря, полному емкостному току сети $3I_{0С}$ за вычетом тока $I_{0Л1}$, замыкающегося через емкость $C_{Л1}$ поврежденной линии:

$$\begin{aligned} I_{ТНП \text{ пов. л.}} &= 3I_{0С} - 3I_{0Л1} = \\ &= 3U_{0К} \omega C - 3U_{0К} \omega C_{Л1}, \end{aligned} \quad (9-18)$$

где C — емкость фазы всей сети.

Этот ток направлен от шин к месту замыкания, т. е. противоположен току в неповрежденных линиях.

При наличии ДГК на указанный емкостный ток накладывается индуктивный ток дугогасящей катушки $3I_{0Л} = 3U_{0К}/x_L$, показанный на рис. 9-11 пунктиром.

В этом случае результирующий ток в ТНП поврежденной линии Л1 равен разности двух токов:

$$I_{ТНП \text{ пов. л.}} = 3I_{0Л} - (3I_{0С} - 3I_{0Л1}) = \frac{3U_{0К}}{x_L} - 3U_{0К} \omega (C - C_{Л1}). \quad (9-19)$$

Направление результирующего тока $I_{ТНП \text{ пов. л.}}$ зависит от того, какая составляющая (индуктивная или емкостная) преобладает в нсм.

4) Токораспределение показывает, что в некомпенсированной сети могут применяться направленные защиты, реагирующие на реактивную мощность нулевой последовательности, обусловленную емкостным током.

В сети с перекомпенсацией емкостного тока направленная защита реактивной мощности не применима, так как реактивный ток в поврежденной линии и емкостный в неповрежденной имеют одинаковое направление.

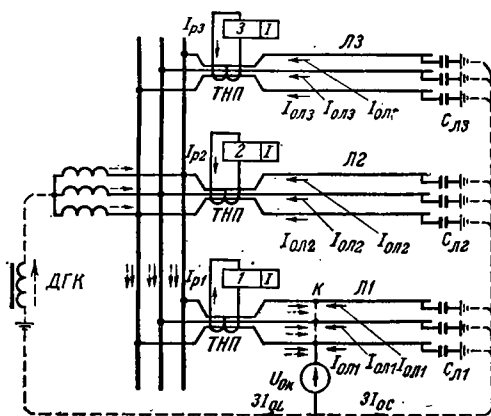


Рис. 9-11. Распределение токов нулевой последовательности при однофазном замыкании на землю.

е) Ток срабатывания токовой защиты

Для обеспечения селективного действия защиты (например, защиты I на рис. 9-11) необходимо отстроить ее ток срабатывания от емкостного тока, проходящего по защищаемой линии $Л1$ при замыканиях на землю на других присоединениях, и от тока небаланса при к. з. в сети. Если емкость фазы защищаемой линии равна $C_{л}$, то емкостный ток в защите при внешнем замыкании на землю равен утроенному току $I_{0л}$ этой линии, т. е. $I_p = 3I_{0(л)} = 3U_{ф}\omega C_{л}$.

При перемежающейся дуге в месте повреждения возможны броски емкостного тока, в 4—5 раз превышающие его установившееся значение. Исходя из этого, первичный ток срабатывания защиты принимают равным:

$$I_{с.з} = k_в k_б 3U_{ф}\omega C_{л}, \quad (9-20)$$

где $k_б$ — коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока, равный 4—5; при наличии выдержки времени $k_б \approx 2 \div 3$; $k_в$ — коэффициент надежности, равный 1,1—1,2.

Выбранный, таким образом, ток срабатывания всегда оказывается надежно отстроенным и от токов небаланса, возникающих в ТНП не только при нагрузке, но и при междофазных к. з.

Чувствительность защиты при замыканиях на землю на защищаемой линии проверяется по отношению токов, протекающих через ТНП поврежденной линии, к току срабатывания защиты:

$$k_ч = \frac{I_{ТНП \text{ пов. л.}}}{I_{с.з.}}. \quad (9-21)$$

В числитель (9-21) подставляется $I_{ТНП \text{ пов. л.}}$ по (9-18) или (9-19). Чувствительность защиты считается достаточной, если коэффициент чувствительности $k_ч$ равен 1,25 для кабельных и 1,5 для воздушных линий. Вследствие сложности вычисления вторичного тока ТНП по первичному, реле регулируется на заданный ток срабатывания подачей тока в первичную цепь.

ж) Оценка токовой защиты

Чувствительность рассмотренной токовой защиты ограничивается необходимостью ее отстройки от бросков емкостного тока при замыканиях на землю на других линиях. В результате этого для надежного и селективного действия токовой защиты требуется увеличение тока замыкания на землю сверх допустимого предела, в то время как для повышения надежности работы компенсированных сетей необходимо снижать этот ток. Недостаточная чувствительность токовых защит, реагирующих на емкостный ток сети, особенно проявляется на подстанциях с малым числом линий, а также в компенсированных сетях с малым оста-

точным током. В этих случаях емкостный ток неповрежденной линии (от которого отстраивается ее защита) становится соизмеримым с током замыкания на землю в поврежденной линии.

В связи с этим токовая защита в компенсированных сетях применяется редко.

В сетях торфоразработок применяется реле типа МТР-77 повышенной чувствительности [Л. 40, 41]. Это реле выполнено с помощью магнитного усилителя и питается от специального ТНП типа КНТ-36, имеющего сердечник из пермаллоя (МО). Реле МТР в сочетании с трансформатором КНТ действует при 0,3 А первичного тока $3I_0$.

а) Защита с использованием токов не промышленной частоты

На рис. 9-12 приведена схема устройства, использующего ток с частотой 100 Гц [Л. 38].

На сердечнике обычной дугогасящей катушки 1 помещается дополнительная обмотка низкого напряжения 2, включаемая кратковременно через специальный контактор 3 при появлении напряжения нулевой последовательности. Дополнительная обмотка 2 замыкается через однополупериодный выпрямитель 4 на балластное сопротивление 5.

Нормально в дугогасящей катушке тока нет. При замыкании на землю через катушку идет ток $3I_{0L}$, который наводит в дополнительной обмотке 2 э. д. с. E_2 . С помощью автоматики, реагирующей на появление U_0 , контактор 3 замыкает цепь дополнительной обмотки, в которой при этом возникает ток. Благодаря однополупериодному выпрямителю ток в дополнительной обмотке содержит значительную составляющую второй гармоники (100 Гц). Наличие последней вызывает появление второй гармоники и в первичном токе ДГК.

Поскольку ток дугогасящей катушки замыкается через место повреждения, то ток второй гармоники появляется в ТНП только заземлившейся линии, обеспечивая селективную сигнализацию.

Устройство, реагирующее на ток второй гармоники (рис. 9-12, б), состоит из токового реле 1, выполненного на выпрямленном токе. Реле включено на ТНП через фильтр токов второй гармоники 2. Для токов других гармоник фильтр имеет большое сопротивление. Поскольку это сопротивление имеет конечную величину, небольшая часть тока других частот попадает в реле 1. Поэтому для обеспечения селективности ток срабатывания реле 1 рекомендуется принимать не меньше 10% емкостного тока защищаемой линии. Такая отстройка предупреждает срабатывание реле при повреждениях на других присоединениях.

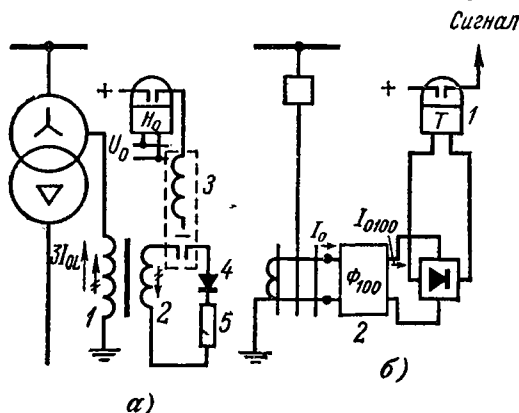


Рис. 9-12. Схема селективной сигнализации с использованием тока 2-й гармоники (с частотой 100 Гц).

а — устройство для получения 2-й гармоники тока замыкания на землю; б — устройство сигнализации, реагирующее на ток 2-й—5-й гармоник.

9-5. Направленная защита

В радиальных сетях, когда собственные емкостные токи отдельных присоединений велики и соизмеримы с полным емкостным током сети, токовая защита неприменима. В этом случае имеется принципиальная возможность использовать направленные защиты, которые не требуются отстраивать от собственных емкостных токов защищаемой линии.

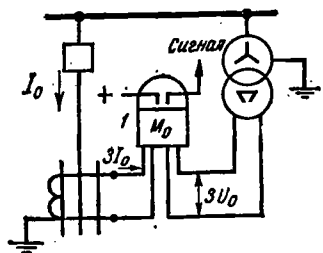


Рис. 9-13. Принципиальная схема направленной защиты от замыканий на землю.

Направленная защита (рис. 9-13) состоит из одного реле мощности, которое включается на ток и напряжение нулевой последовательности.

В некомпенсированной сети защита реагирует на мощность нулевой последовательности, создаваемую емкостным током линии. Как следует из токораспределения на рис. 9-11, направление тока, а следовательно, и мощности на поврежденной и неповрежденной линиях противоположны и, следовательно, по знаку мощности направленное реле может определить поврежденную линию.

Учитывая, что емкостный ток I_0 сдвинут относительно напряжения на 90° , применяют реле мощности синусного типа, реагирующее на

$$S_p = 3U_0 3I_0 \sin \varphi_0.$$

В сети, работающей с перекомпенсацией емкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в поврежденной линии, и емкостный ток в неповрежденной имеют одинаковое направление.

В перекомпенсированной сети реле мощности используется в тех случаях, когда для действия защиты создается активный ток искусственным путем. В этом случае должно применяться реле мощности косинусного типа.

Для обеспечения селективности при «земле» в сети реле мощности направленной защиты должно отстраиваться от тока и напряжения небаланса, обусловленного нагрузкой, протекающей по данной линии; этим условием ограничивается чувствительность защиты.

Реле мощности должны иметь высокую чувствительность. При питании токовой обмотки реле от ТНП нужно учитывать большую угловую погрешность последнего. Для правильной работы направленной защиты требуется малая угловая погрешность измерительных трансформаторов и точность угловой характеристики реле (см. рис. 2-39).

Возможно также использовать активную составляющую тока замыкания на землю, которая обуславливается активным

сопротивлением дугогасящей катушки и сопротивлением, определяющим активные потери в сети. Эта составляющая невелика и достигает 3—5% тока катушки. Активный ток катушки замыкается только по поврежденному присоединению на него, и должна реагировать защита.

Защита выполняется с помощью реле мощности, как показано на рис. 9-13, косинусного типа, реагирующего только на активную составляющую мощности нулевой последовательности. Опыт эксплуатации этих защит показывает, что они имеют относительно большой процент неправильной работы.

Чебоксарский электроаппаратный завод начал выпуск направленной защиты типа ЗЗП-1 [Л. 40], предназначенной для электросетей, питающих торфоразработки. Эта защита имеет угол максимальной чувствительности, равный 90° , выполнена на полупроводниках и обладает высокой чувствительностью, реагируя на емкостный ток $I_3 = 0,07 \div 2$ А.

9-6. ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ ТОКА КОМПЕНСИРОВАННОЙ СЕТИ

Дугогасящая катушка компенсирует емкостный ток основной частоты (50 Гц). Исследования показали, что ток замыкания на землю содержит, кроме основной гармоники, составляющие высших гармоник, которые остаются некомпенсированными.

Составляющие высших гармоник в установившемся индуктивном и емкостном токе при замыканиях на землю вызываются наличием гармонических составляющих в э. д. с. генераторов и искажений, обусловленных нелинейностью нагрузок (главным образом силовых трансформаторов).

Ток в поврежденном присоединении равен сумме основных и высших гармоник емкостных токов всех неповрежденных присоединений, на этот ток накладывается ток дугогасящей катушки, имеющий много гармоник, поэтому результирующий ток I_0 поврежденного присоединения содержит значительно больше гармоник, чем ток в неповрежденных присоединениях.

Основываясь на этом различии, выполняют токовую защиту, реагирующую на сумму высших гармоник тока I_0 .

Защита осуществляется с помощью токового реле 1 (рис. 9-14), включенного на ток сети через фильтр 2, запирающий путь в реле токам основной частоты 50 Гц.

Состав гармоник и их величина зависят от режима сети, числа линий и уровня напряжения, что является недостатком, ограни-

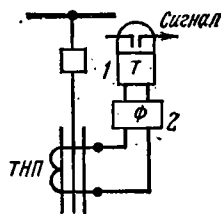


Рис. 9-14. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующая на токи высших гармоник.

чивающим использование защит, действующих на указанном принципе. В Советском Союзе применяется защита типов УСЗ-1 и УСЗ-3, разработанная ВНИИЭ. Схемы этих защит подробно описаны в [Л. 38, 55]. Опыт эксплуатации показывает, что защита, реагирующая на высшие гармоники тока I_0 , обладает достаточно хорошей селективностью и широко применяется в сетях 6—10 кВ.

9-7. ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА ТОКИ НЕУСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА

К этой группе относятся два вида защит. Одни реагируют на появление тока высокой частоты, а вторые — на знак волн тока или соответствующий ему мощности.

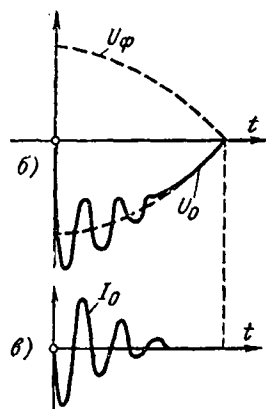
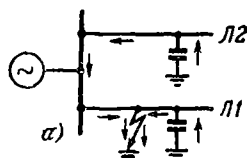


Рис. 9-15. Переходный процесс при замыкании на землю.

а — схема сети; б — кривая напряжения U_0 и U_ϕ в начальный момент замыкания на землю; в — кривая изменения тока I_0 в начальный момент повреждения.

Токи высокой частоты возникают во время переходного процесса при замыканиях на землю. Их появление объясняется тем, что в начальный момент замыкания на землю емкость заземлившейся фазы разряжается, а емкости двух других фаз дозаряжаются, поскольку напряжения на них относительно земли возрастают до междупазного [Л. 37].

Указанный процесс разряда и дозаряда емкостей фаз носит характер периодических, затухающих колебаний (рис. 9-15). Частота колебаний и скорость их затухания определяются L , C и R зарядного и разрядного контуров. Расчеты и опыты показывают, что частота переходного тока меняется в зависимости от параметров сети от 200 до 3000 Гц, а время его затухания очень мало и имеет величину от 0,01 до 0,025 с.

С некоторым приближением считается, что отношение максимальных значений переходных токов к их установившимся значениям пропорционально отношению частот f переходного режима к рабочей частоте 50 Гц. Поэтому переходные токи могут в десятки раз превосходить токи установившегося режима.

На поврежденной линии переходный ток имеет максимальное значение. На неповрежденных линиях величина этого тока соответственно меньше, а его направление противоположно направлению тока в поврежденной линии.

Наличие компенсации не влияет на характер переходного процесса, так как индуктивность дугогасящих катушек и заземляющих трансформаторов значительно больше индуктивности проводов, и поэтому ток дугогасящего устройства нарастает очень медленно и появляется после завершения переходного процесса.

В сетях с большим активным сопротивлением R_0 и при удаленных замыканиях, связанных с увеличением R контура, процесс разряда и заряда может приближаться к аperiodическому, что ограничивает возможности применения подобных защит. Защита выполняется с помощью быстродействующих токовых реле, включаемых через фильтр, пропускающий в реле только токи высокой частоты.

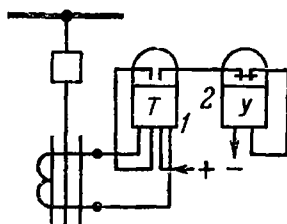


Рис. 9-16. Принципиальная схема токовой защиты от замыканий на землю, реагирующей на емкостные токи переходного процесса.

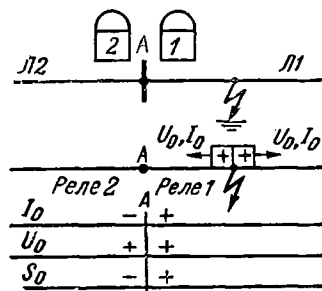


Рис. 9-17. Знак волн тока, напряжения и мгновенной мощности при замыкании на землю.

Защита, реагирующая на величину тока переходного периода, разработанная в Одессаэнерго [Л.39], показана на рис. 9-16. Реагирующее токовое реле должно отличаться особым быстродействием и реагировать на кратковременный (импульсный) ток, каким является переходный ток высокой частоты. В схеме на рис. 9-16 используется реле типа ЭТ с дополнительной удерживающей обмоткой постоянного тока, с помощью которой сработавшее от импульса тока реле 1 удерживается в сработавшем состоянии, пока не подействует указательное реле 2.

Принцип действия защиты, реагирующей на волновые процессы, основан на появлении в момент замыкания на землю электромагнитных волн.

Разряд емкости заземлившейся фазы, происходящий в первый момент замыкания, характеризуется появлением волн тока и напряжения нулевой последовательности, распространяющихся в обе стороны от места повреждения (рис. 9-17) по контуру фаза — земля.

Как видно из рис. 9-17, направление (или знак) тока и мгновенной мощности в поврежденном и неповрежденных присоединениях (относительно шин А) будет различным. Это различие в зна-

ках используется для выполнения защиты, реагирующей на знак волны тока или на знак мгновенной мощности на фронте волны. В качестве реагирующих органов в первом случае используется

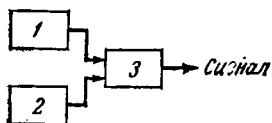


Рис. 9-18. Блок-схема устройства УСЗ-1.

1 — орган, реагирующий на переходный процесс; 2 — орган, реагирующий на высшие гармоники переходного процесса; 3 — логическая часть схемы.

реле, сравнивающее направление тока с направлением напряжения нулевой последовательности (на поврежденном элементе они совпадают, и на неповрежденном различны). Конструкция такой защиты с тириatronным реле разработана и применяется в Одессаэнерго [Л. 38].

Во втором случае применяется импульсное реле мощности. Конструкция подобного реле разработана в Энергетическом институте имени Г. М. Кржижановского [Л. 38]. Во ВНИИЭ разработана универсальная защита типа УСЗ-1, состоящая из элемента, реагирующего на знак мощности S_0 переходного процесса, и элемента, реагирующего на высшие гармоники. Такая защита (рис. 9-18) способна фиксировать установившиеся повреждения и кратковременные замыкания.

ГЛАВА ДЕСЯТАЯ

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ

10-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

На линиях, отходящих от шин электростанций или узловых подстанций энергосистем, часто по условиям устойчивости требуется обеспечить отключение к. з. в пределах всей защищаемой линии без выдержки времени ($t = 0$). Это требование нельзя выполнить с помощью рассмотренных выше мгновенных токовых отсечек, так как зона их действия охватывает только часть защищаемой линии. Кроме того, отсечки неприменимы на коротких линиях, где токи к. з. в начале и конце линии не имеют существенного различия. В этих случаях используются защиты, принцип действия которых обеспечивает отключение повреждений без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии, в том числе и на линиях малой протяженности.

К защитам такого типа относятся дифференциальные защиты. Они обеспечивают мгновенное отключение к. з. в любой точке защищаемого участка и обладают селективностью при к. з. за пределами защищаемой линии (внешние к. з.).

Дифференциальные защиты подразделяются на продольные и поперечные. Первые служат для защиты как одинарных, так и параллельных линий, вторые — только параллельных линий.

10-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Принцип действия продольных дифференциальных защит основан на сравнении величины и фазы токов в начале и конце защищаемой линии.

Как видно из рис. 10-1, при внешнем к. з. токи I_I и I_{II} на концах линии AB направлены в одну сторону и равны по величине, а при к. з. на защищаемой линии они направлены в разные стороны и, как правило, не равны друг другу¹. Следовательно, сопоставляя величину и фазу токов I_I и I_{II} , можно определять, где возникло к. з. — на линии или за ее пределами. Такое сравнение токов по величине и фазе осуществляется в реагирующем органе (реле) дифференциальной защиты.



Рис. 10-1. Токи по концам линии.

а — при внешних к. з.; б — при к. з. на линии.

Для этой цели по концам линии устанавливаются трансформаторы тока TI и TII (рис. 10-2) с одинаковым коэффициентом трансформации. Их вторичные обмотки соединяются при помощи соединительного кабеля и подключаются к дифференциальному реле таким образом, чтобы при внешних к. з. ток в реле был равен разности токов в начале и конце линии, т. е. $\dot{I}_I - \dot{I}_{II}$, а при к. з. на линии — их сумме $\dot{I}_I + \dot{I}_{II}$.

Имеются две принципиально различные схемы дифференциальных защит с циркулирующими токами и уравновешенными напряжениями.

В схеме с циркулирующими токами (рис. 10-2, а) вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются так, чтобы при внешнем к. з. их э. д. с. были направлены последовательно, а токи в соединительных проводах имели одинаковое направление. Дифференциальное реле P включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока, образуя цепь для замыкания вторичных токов I_{BI} и I_{BII} .

При к. з. вне защищаемой линии (рис. 10-2, а), а также в нормальном режиме первичные токи $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ в начале и в конце линии равны по величине и направлены в одну сторону.

¹ Обычно токи, проходящие от сборных шин в линию, считаются положительными, а к сборным шинам — отрицательными. При такой условности токи по концам линий в режиме внешнего к. з. и нагрузки имеют противоположные знаки, т. е. сдвинуты по фазе на 180° , а при к. з. на линии — одинаковые, или совпадают по фазе.

Вторичные токи $\dot{I}_{вI}$ и $\dot{I}_{вII}$ каждого трансформатора тока замыкаются через обмотку реле P и проходят по ней в противоположных направлениях, навстречу друг к другу. Поэтому ток в реле равен геометрической разности вторичных токов, т. е.

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}, \quad (10-1)$$

или, выражая вторичные токи через первичные, получаем:

$$\dot{I}_p = \frac{\dot{I}_I}{n_{TI}} - \frac{\dot{I}_{II}}{n_{TII}}. \quad (10-1a)$$

При равенстве коэффициентов трансформации $n_{TI} = n_{TII} = n$ и отсутствии погрешностей в работе трансформаторов тока $\dot{I}_{вI} = \dot{I}_{вII}$ вторичные токи, поступающие в обмотку реле, балансируются, ток $\dot{I}_p = 0$ и реле не работает. Аналогичное положение

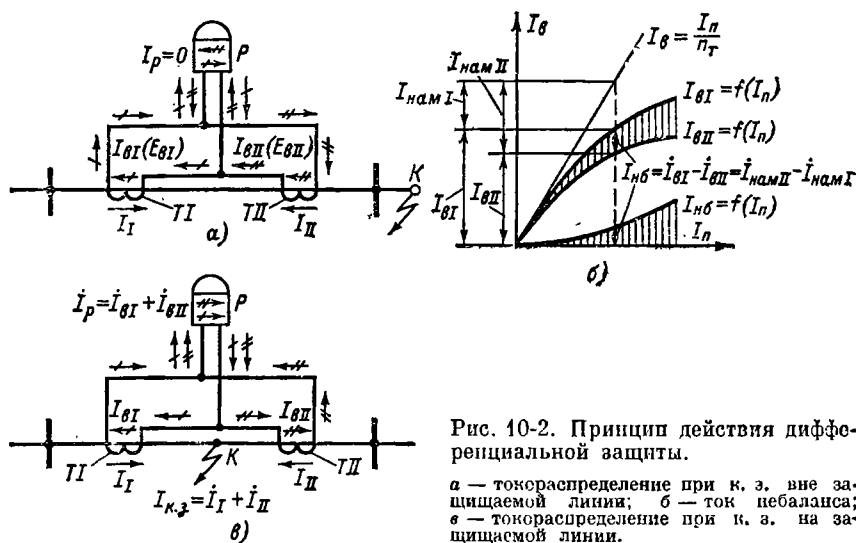


Рис. 10-2. Принцип действия дифференциальной защиты.

а — токораспределение при к. з. вне защищаемой линии; б — ток небаланса; в — токораспределение при к. з. на защищаемой линии.

имеет место и при качаниях. Таким образом, по принципу действия дифференциальная защита не реагирует на внешние к. з., токи нагрузки и качания, поэтому она выполняется без выдержки времени и не должна отстраиваться от токов нагрузки и качания. В действительности (см. § 3-1 и 3-2) трансформаторы тока работают с погрешностью (рис. 10-2, б), вследствие этого вторичные токи имеют некоторое различие по величине и по фазе, а их разность не равна нулю. В реле появляется ток н е б а л а н с а

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}. \quad (10-2)$$

Для исключения неселективной работы защиты при внешних к. з. ток срабатывания дифференциальной защиты должен пре-

вышать максимальное значение тока небаланса:

$$I_{\text{с.з.}} > I_{\text{нб. макс.}} \quad (10-2a)$$

При к. з. на защищаемой линии (рис. 10-2, в) первичные токи I_I и I_{II} направлены от шин подстанции в линию (к месту к. з.). При этом направление первичного тока на одном из концов линии, по сравнению с его направлением при внешнем к. з., меняется на противоположное (ток I_{II} на рис. 10-2, в). Соответственно меняется направление вторичного тока $I_{вII}$ в трансформаторе тока на этом конце линии. Из показанного на рис. 10-2, в токораспределения видно, что вторичные токи $I_{вI}$ и $I_{вII}$ в этом случае проходят в обмотке реле P в одном направлении, поэтому ток в реле равен их сумме

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{вI} + \dot{I}_{вII} = \frac{\dot{I}_I}{n} + \frac{\dot{I}_{II}}{n} = \frac{\dot{I}_{\text{к.з.}}}{n}, \quad (10-3)$$

где $I_{\text{к.з.}}$ — полный ток к. з., равный сумме токов I_I и I_{II} , притекающих к месту повреждения (к точке К).

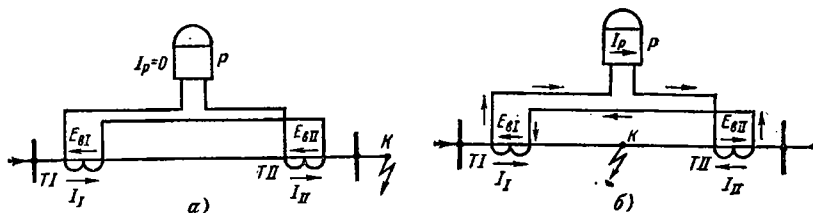


Рис. 10-3. Принцип действия дифференциальной защиты по равновесию напряжения.

а — при внешних к. з.; б — при к. з. на защищаемой линии.

Под влиянием этого тока защита срабатывает. Выражение (10-3) показывает, что дифференциальная защита реагирует на полный ток к. з. $I_{\text{к.з.}}$ в месте повреждения, и поэтому в сети с двусторонним питанием она обладает большей чувствительностью, чем токовые защиты, реагирующие на ток, проходящий только по одному концу линии. Зона действия защиты охватывает участок линии, расположенный между трансформаторами тока TI и TII .

В схеме с уравновешенным напряжением (рис. 10-3, а) вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются так, чтобы в условиях внешнего к. з. их э. д. с. были направлены встречно, а реле включается последовательно в цепь соединительных проводов.

При внешних к. з., а также при прохождении токов нагрузки вторичные э. д. с. трансформаторов тока равны и совпадают по фазе ($\dot{E}_{вI} = \dot{E}_{вII}$), поскольку $I_I = I_{II}$, а $n_{TI} = n_{TII}$. Отсюда следует, что ток

$$I_p = \frac{\dot{E}_{вI} - \dot{E}_{вII}}{z} = 0,$$

где z — полное сопротивление контура «трансформаторы тока — реле».

Погрешности трансформаторов тока нарушают баланс вторичных э. д. с. и вызывают появление э. д. с. небаланса ($\dot{E}_{нб} = \dot{E}_{вI} - \dot{E}_{вII}$). Под действием $\dot{E}_{нб}$ в реле возникает ток небаланса $I_{нб}$. Так же как и в схеме с циркулирующими токами, для обеспечения селективности защиты при внешних к. з. ток срабатывания реле должен превышать ток небаланса.

При к. з. в зоне защиты (рис. 10-3, б) вторичные э. д. с. $\dot{E}_{вI}$ и $\dot{E}_{вII}$ складываются и вызывают в реле ток I_p , под действием которого оно срабатывает.

В схемах дифференциальных защит находят применение оба принципа. Ниже рассмотрены дифференциальные защиты, основанные на принципе циркуляции токов, так как защиты этого типа получили распространение в СССР.

10-3. ТОКИ НЕБАЛАНСА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ

Правильный учет тока небаланса в схеме дифференциальной защиты имеет существенное значение, поскольку от его величины зависит ток срабатывания защиты (10-2а).

В схеме защиты с циркулирующими токами (рис. 10-2, а) ток $\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{вI} - \dot{I}_{вII}$.

Выразив вторичные токи через первичные с учетом погрешности трансформаторов тока (см. § 3-1), получим:

$$\dot{I}_{нб} = \left(\frac{\dot{I}_I}{n_T} - \dot{I}_{I\text{нам}} \right) - \left(\frac{\dot{I}_{II}}{n_T} - \dot{I}_{II\text{нам}} \right),$$

где $\dot{I}_{I\text{нам}}$ и $\dot{I}_{II\text{нам}}$ — токи намагничивания, отнесенные ко вторичным обмоткам $ТТ$.

Так как при внешнем к. з. $I_I = I_{II}$, то

$$\dot{I}_{нб} = \dot{I}_{II\text{нам}} - \dot{I}_{I\text{нам}}. \quad (10-4)$$

Выражение (10-4) показывает, что для уменьшения тока небаланса необходимо выравнивать токи $\dot{I}_{I\text{нам}}$ и $\dot{I}_{II\text{нам}}$ (рис. 10-2, б) по величине и фазе, тогда их разность будет минимальной.

Ток намагничивания (см. § 3-2) зависит от магнитной индукции B или от вторичной э. д. с. E_v трансформаторов тока (рис. 10-4, а), поскольку B и E_v пропорциональны.

Из сопоставления характеристик 1 и 2 на рис. 10-4, а следует, что ток небаланса будет равен нулю при полной идентичности (совпадении) характеристик намагничивания 1 и 2 трансформаторов тока TI и TII (рис. 10-2, а) и равенстве вторичных э. д. с. E_v .

Выполнить эти требования с абсолютной точностью на практике не удастся, и поэтому ток небаланса всегда имеется. Он возрастает с увеличением магнитной индукции B , которая в свою

очередь повышается при увеличении первичного тока I_n и вторичной нагрузки z_n . Ток $I_{нб}$ особенно возрастает при насыщении трансформаторов тока, так как при этом резко усиливается различие в токах намагничивания трансформаторов тока. Поэтому, помимо обеспечения наибольшей идентичности характеристик намагничивания, стремятся к тому, чтобы при максимальном токе внешнего к. з. магнитопроводы трансформаторов тока не насыщались.

Для выполнения этого условия используются следующие пути:

1. Применяются трансформаторы тока, насыщающиеся при возможно больших кратностях тока к. з. и вторичной нагрузки z_n .

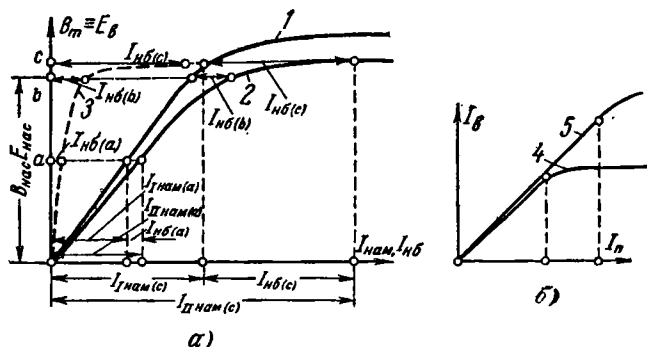


Рис. 10-4. Характеристика намагничивания трансформаторов тока TI и TII на рис. 10-2 и ток небаланса, обусловленный неидентичностью характеристик (а); характеристики намагничивания трансформаторов тока класса 0,5 и класса D (б).

1 — вторичная э. д. с. $TIE_{IB} = f(I_{нм})$; 2 — вторичная э. д. с. $TIE_{II} = f(I_{IIнм})$; 3 — $I_{нб} = f(E_B \text{ или } B_m)$ при $E_{IB} = E_{II}$; 4 — характеристика трансформатора тока класса 0,5; 5 — характеристика трансформатора тока класса D .

Этому требованию наилучшим образом удовлетворяют трансформаторы тока класса $P(D)$, специально изготавливаемые для дифференциальных защит (рис. 10-4, б).

2. Принимаются меры для ограничения величины вторичной э. д. с. E_B , от которой зависит значение магнитной индукции B ($B \equiv E_B$). Чтобы избежать насыщения, как видно из рис. 10-4, а, необходимо иметь $E_B < E_{нас}$. Поскольку

$$E_B = I_B (z_B + z_n) = \frac{I_n}{n_T} (z_B + z_n), \quad (10-5)$$

то для ограничения E_B необходимо при заданных I_n и z_B уменьшать нагрузку z_n трансформаторов тока и увеличивать их коэффициент трансформации n_T .

Кроме того, для выравнивания токов $I_{\text{I на м}}$ и $I_{\text{II на м}}$ необходимо выравнивать нагрузку вторичных обмоток трансформаторов тока, т. е. обеспечивать условие $z_{\text{I н}} = z_{\text{II н}}$.

В схеме с циркуляцией токов нагрузку каждого трансформатора тока составляет сопротивление соединительных проводов от трансформаторов тока до места включения реле. Сопротивление реле не учитывается, так как в условиях внешнего к. з. ток в нем отсутствует.

Сопротивление нагрузок $z_{\text{I н}}$ и $z_{\text{II н}}$, при которых трансформаторы тока работают в прямолинейной части характеристики намагничивания, выбирается по кривым предельной кратности, обеспечивающим погрешность трансформаторов тока не более 10%.

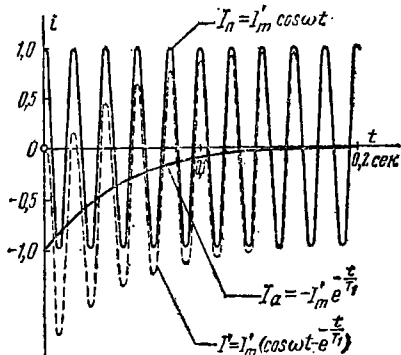


Рис. 10-5. Периодическая и аperiodическая составляющие тока к. з.

ние сердечника, образуя ток $I_{\text{на м}}$, что наглядно иллюстрируется с помощью схемы замещения трансформатора тока, показанной на рис. 10-6.

Скорость изменения $\left(\frac{dt}{dt}\right)$ аperiodической составляющей $I_a = -I_m e^{t/T_1}$ значительно меньше скорости изменения переменной составляющей $I_n = I_m \sin (\omega t - 90)$. Поэтому ток I_a плохо трансформируется во вторичную цепь и большая его часть $I_{a, \text{на м}}$ идет на намагничивание сердечника. В результате этого трансформатор тока насыщается, что ухудшает трансформацию аperiodической составляющей и повышает долю этого тока $I_{a, \text{на м}}$, идущую на намагничивание. Таким образом, *подмагничивающее действие аperiodической составляющей резко увеличивает намагничивающие токи и токи небаланса в переходном режиме к. з.*

Типичная кривая сквозного тока к. з. и тока небаланса в переходном режиме к. з. приведена на рис. 10-7, а и б. Кривая тока небаланса имеет две характерные особенности: во-первых, ток $I_{\text{нб}}$ достигает наибольшего значения не в момент максимума первичного тока к. з. (кривая I_n), а несколько позже и затухает медленнее тока I_n . Во-вторых,

Ток $I_{\text{нб}}$ в неустановившемся режиме. Токи намагничивания, а вместе с ними и токи небаланса резко возрастают в первый момент к. з. Как известно, в первый момент к. з. ток к. з. состоит из периодической I_n и аperiodической I_a составляющих (рис. 10-5).

Каждая составляющая, протекая по первичной обмотке трансформатора тока, делится на две части: одна трансформируется во вторичную обмотку, а вторая идет на намагничивание

кривая $I_{нб}$ имеет асимметричный характер и содержит большую аperiodическую составляющую $I_{а.нб}$, которая в основном определяет продолжительность затухания и величину тока $I_{нб}$ в переходный период. В этом можно убедиться, разложив кривую $I_{нб}$ на ее составляющие, как это показано на рис. 10-7, в. Каждая

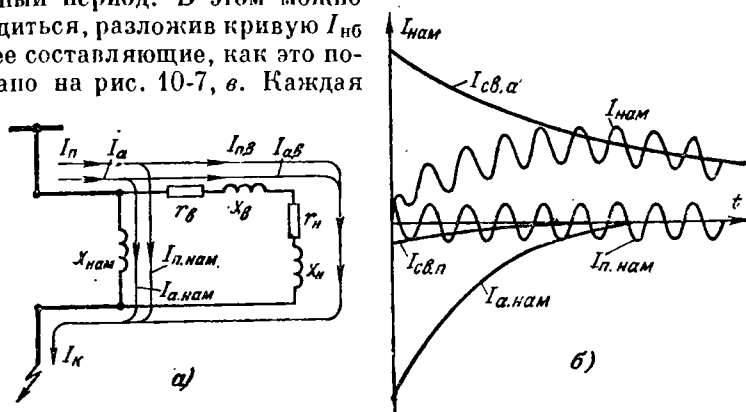


Рис. 10-6. Схема замещения трансформатора тока и распределение периодической и аperiodической составляющих тока к. з. между ветвями намагничивания и вторичной обмотки (а) и кривые тока намагничивания и его составляющих (б).

из этих составляющих является (при отсутствии насыщения) разностью соответствующих токов намагничивания трансформаторов тока защиты, поскольку $I_{нб} = I_{п.нам} - I_{нм}$.

В частном случае, когда один из трансформаторов тока дифференциальной защиты работает без погрешности (например, $I_{нм} = 0$), ток небаланса имеет наибольшую величину и равен току намагничивания второго трансформатора тока, т. е. $I_{нб} = I_{п.нам}$.

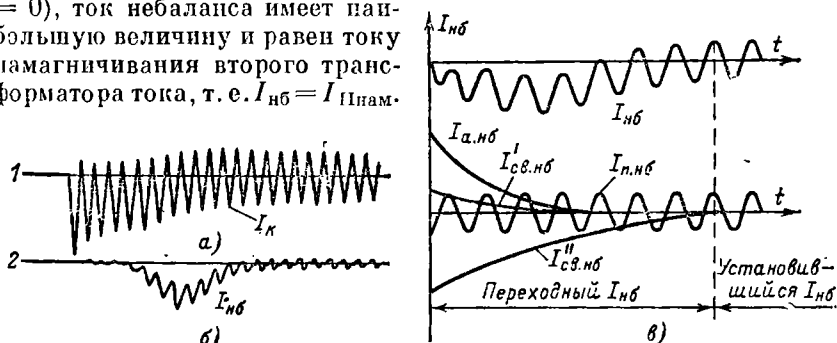


Рис. 10-7. Ток небаланса в реле при внешних к. з.

а — ток к. з.; б — ток небаланса; в — разложение $I_{нб}$ на периодическую и аperiodическую составляющие: $I_{п.нб} = I_{п.нам} II - I_{п.нам} I$; $I_{а.нб} = I_{а.нам} II - I_{а.нам} I$.

В этом предельном случае кривые $I_{нам}$ и $I_{нб}$ совпадают, а в общем случае при $I_{нам}$ и $I_{п.нам} > 0$ кривая $I_{нб}$ аналогична по форме кривой $I_{нам}$.

Типичная кривая тока $I_{\text{нам}}$ трансформатора в переходный период при к. з. с током $I_{\text{к}}$ по рис. 10-7, а приведена на рис. 10-6, б. Как показано на рис. 10-6, а, при к. з. в сети в ветви намагничивания появляются вынужденные периодические и аperiodические токи намагничивания: $I_{\text{п. нам}}$ и $I_{\text{а. нам}}$. Так как в цепи, содержащей индуктивность, ток изменяться скачком не может, то в ветви намагничивания появляются свободные аperiodические токи $I_{\text{св. п}}$ и $I_{\text{св. а}}$, компенсирующие в первый момент времени вынужденные составляющие: $I_{\text{п. нам}}$ и $I_{\text{а. нам}}$.

Диаграмма вынужденных и свободных токов небаланса показана на рис. 10-7, в.

Свободные токи замыкаются в контуре вторичной обмотки (рис. 10-6, а) и затухают с постоянной времени T_2 , определяемой параметрами этого контура:

$$T_2 = \frac{L_{\text{нам}} + L_{\text{в}} + L_{\text{н}}}{r_{\text{в}} + r_{\text{н}}}.$$

Результирующий ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ (рис. 10-6, б) равен в каждый момент времени алгебраической сумме четырех составляющих: $I_{\text{нам}} = I_{\text{п. нам}} - I_{\text{св. п}} + I_{\text{а. нам}} - I_{\text{св. а}}$. Из рис. 10-6, б видно, что величина и время затухания $I_{\text{нам}}$ зависят в основном от свободного тока $I_{\text{св. а}}$.

Постоянная времени $T_2 \gg T_1$, что и приводит к запаздыванию нарастания и увеличению продолжительности переходного процесса в токе намагничивания, а следовательно, и в токе небаланса. Из сказанного вытекает, что характерные особенности кривой $I_{\text{нб}}$ обуславливаются появлением свободной составляющей в токе намагничивания, замыкающейся в контуре вторичной обмотки трансформаторов тока. После затухания аperiodических токов изменение $I_{\text{нб}}$ прекращается и его величина достигает установившегося значения.

Таким образом, возникновение к. з. сопровождается переходным процессом как в первичной, так и во вторичной цепи трансформаторов тока, появляющиеся при этом аperiodические свободные токи усугубляют работу трансформаторов тока, вызывая повышенное намагничивание их магнитопровода. В результате этого в дифференциальной защите во время переходного периода возникают повышенные токи небаланса.

Точных и удобных для практики способов расчета тока небаланса пока еще не разработано. На практике пользуются приближенными расчетными формулами, приведенными в «Руководящих указаниях по релейной защите». В частности, для приближенного учета влияния аperiodической составляющей тока к. з. в неустановившемся режиме при выборе трансформаторов тока вводится коэффициент $k_{\text{а}}$, с учетом которого $m_{\text{расч}} = k_{\text{а}} I_{\text{к макс}} / I_{\text{ном. т. т.}}$. Для быстродействующих защит $t \leq 0,1$ с принимают $k_{\text{а}} = 2$, для защит с $t = 0,1 \div 0,3$ с $k_{\text{а}} = 1,5$ и при 1 с $k_{\text{а}} = 1$. Такой способ учета влияния аperiodиче-

ской составляющей является приближенным и требует уточнения.

Существенное влияние на увеличение тока небаланса оказывает также остаточное намагничивание магнитопровода трансформаторов тока.

Трансформатор тока остается в намагниченном состоянии, если проходящий через него ток прерывается (отключается) в момент времени, когда он и создаваемый им магнитный поток не равны нулю. В этом случае в сердечнике трансформатора тока остается магнитный поток $\Phi_{\text{ост}}$, который был в нем в момент отключения тока. Если при последующем к. з. остаточный поток $\Phi_{\text{ост}}$ совпадает по знаку с магнитным потоком $\Phi_{\text{к.з.}}$, обусловленным током к. з. (особенно его аperiодической составляющей), то образуется результирующий поток, равный их сумме $\Phi_{\text{ост}} + \Phi_{\text{к.з.}}$. Результирующий поток может достигнуть весьма большой величины и вызвать насыщение магнитопровода, в результате которого резко возрастает ток намагничивания и, как следствие этого, увеличится ток небаланса.

Поэтому при разработке мер, предупреждающих ложное действие дифференциальных защит от токов небаланса, необходимо считаться с влиянием остаточного намагничивания.

10-4. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ЛИНИЙ

В основе всех разнообразных схем и конструкций дифференциальных защит лежат некоторые общие принципы, обусловленные особенностями условий работы этих защит на линиях. Рассмотрим основные из них.

1. В дифференциальных защитах линий трансформаторы тока, соединяемые в дифференциальную схему, находятся на значительном расстоянии. Соединительные провода между ними имеют большое сопротивление и во много раз превышают допустимые пределы нагрузки самых мощных современных трансформаторов тока. Так, например, при длине линии 10 км сопротивление одного соединительного медного провода сечением $1,5 \text{ мм}^2$ составляет:

$$r = \frac{l}{\rho s} = \frac{10\,000}{57 \cdot 1,5} = 130 \text{ Ом},$$

в то время как трансформаторы тока допускают нагрузку 1—2 Ом.

Это затруднение преодолевается при помощи промежуточных трансформаторов тока ПТ (рис. 10-8, а), которые уменьшают ток в соединительных проводах в $n_{\text{п}}$ раз и снижают благодаря этому нагрузку соединительных проводов, приведенную к зажимам основных трансформаторов тока, в $n_{\text{п}}^2$ раз.

Покажем это с помощью рис. 10-8, б и в. Мощность, отдаваемая трансформатором тока в нагрузку,

$$S_{\text{т}} = U_{\text{т}} I_{\text{т}}. \quad (10-6)$$

Напряжение U_T зависит от сопротивления соединительных проводов z_n и проходящего по ним тока I_{n2} . В схеме с промежуточным трансформатором (рис. 10-8, б) $U_T = I_{n2} z_n / n_{\Pi}$, но так как $I_{n2} = I_{\Pi 1} / n_{\Pi}$, то $U_T = \frac{I_{\Pi 1} z_n}{n_{\Pi}^2} = \frac{I_T z_n}{n_{\Pi}^2}$; здесь учтено, что $I_{\Pi 1} = I_T$.

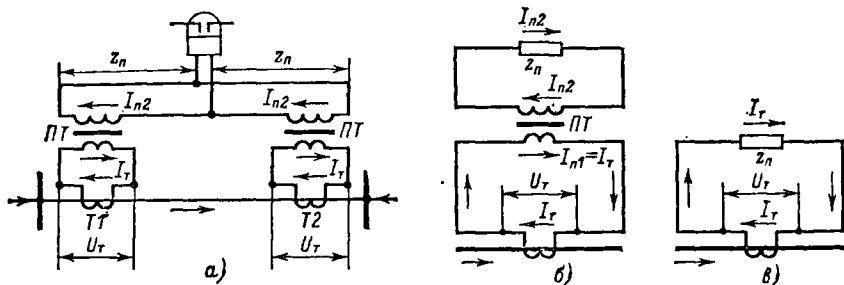


Рис. 10-8. Применение промежуточных трансформаторов тока $ПТ$ для снижения нагрузки на основные трансформаторы тока в n^2 раз.

а — схема включения $ПТ$; б и в — нагрузка трансформаторов тока при наличии $ПТ$ и без него.

Подставляя полученное значение U_T в (10-6), получаем, что при наличии промежуточного трансформатора $ПТ$

$$S_T = \frac{I_{\Pi}^2 z_{\Pi}}{n_{\Pi}^2} = I_T^2 \frac{z_{\Pi}}{n_{\Pi}^2}. \quad (10-6a)$$

Если же включить нагрузку z_{Π} непосредственно на вторичные зажимы трансформатора тока (рис. 10-8, в), то напряжение $U_T = I_T z_{\Pi}$, откуда

$$S_T = U_T I_T = I_T^2 z_{\Pi}. \quad (10-6б)$$

Из сопоставления (10-6a) и (10-6б) следует, что при промежуточном трансформаторе $ПТ$ нагрузка основных трансформаторов тока уменьшается n_{Π}^2 раз.

Указанный способ снижения нагрузки соединительных проводов используется во всех дифференциальных защитах линий.

2. Дифференциальная защита должна воздействовать на отключение выключателей на обоих концах защищаемой линии. Для осуществления этого устанавливаются два дифференциальных реле 1 и 2 — по одному на каждом конце линии (рис. 10-9). Каждое из этих реле действует на свой выключатель.

Введение в схему второго, параллельно включенного реле вносит следующие изменения в условия работы защиты по схеме с циркуляцией токов:

а) Ток, поступающий от трансформаторов тока $ТI$ и $ТII$, распределяется между ближним и дальним реле обратно пропорционально сопротивлениям их цепей (рис. 10-9). В контуре дальнего реле участвуют соединительные провода, и поэтому ток, направляющийся в дальнее реле, меньше, чем ток, поступающий в реле, расположенное вблизи данных трансформаторов тока.

Так, например, вторичный ток трансформаторов тока TI распределяется между реле 1 и 2; при этом ток $I'_I > I''_I$; аналогичным образом ток трансформаторов тока TII делится между реле 2 и 1 так, что $I''_{II} > I'_{II}$. В результате этого токи, поступающие в реле, не балансируются, и поэтому при сквозном к. з. даже при работе трансформаторов тока без погрешностей в реле 1 появляется ток небаланса $I_{р1} = I'_I - I'_{II} = I'_{нб.р1}$, а в реле 2 $I_{р2} = I''_{II} - I''_I = I'_{нб.р2}$. Из сказанного следует, что в схеме с двумя реле кроме тока $I_{нб.т.т.}$, вызванного погрешностью трансформаторов тока, возникает дополнительный ток небаланса $I'_{нб}$, обусловливаемый неравномерным распределением вторичных токов трансформаторов тока между реле. Величина $I'_{нб}$ пропорциональна току к. з. Для уменьшения $I'_{нб}$ необходимо уменьшать сопротивление соединительных проводов $z_{пр.}$.

Каждая защита в зависимости от ее чувствительности имеет предельно допустимое значение $z_{пр.}$. При превышении его защита будет работать неправильно от возросших токов небаланса $I'_{нб}$.

б) При к. з. в зоне в схеме с одним реле в последнее поступает сумма вторичных токов трансформаторов тока $I_p = I_I + I_{II} = I_K$, а в схеме с двумя реле в каждое из них попадает только часть вторичного тока от первого и второго трансформаторов тока.

Если сопротивление проводов равно нулю, то ток в каждом реле $I_p = \frac{I_I}{2} + \frac{I_{II}}{2} = \frac{I_K}{2}$, т. е. в 2 раза меньше, чем в схеме с одним реле. Вследствие этого чувствительность защиты уменьшается. В дифференциальной защите с уравновешенными напряжениями установка двух реле не меняет условий работы схемы.

3. Токи небаланса в дифференциальных защитах линий при сквозных к. з. могут достигать значительных величин не только в переходных режимах, но и в установившихся. Повышенное значение токов небаланса может обуславливаться большими соотношениями токов внешнего к. з., вынужденной разнотипностью трансформаторов тока по концам линии, их значительной загрузкой, сопротивлением соединительных проводов и появлением $I'_{нб}$.

Для отстройки от токов небаланса получили распространение дифференциальные реле с торможением. Ток срабатывания у таких реле возрастает с увеличением тока внешнего к. з.

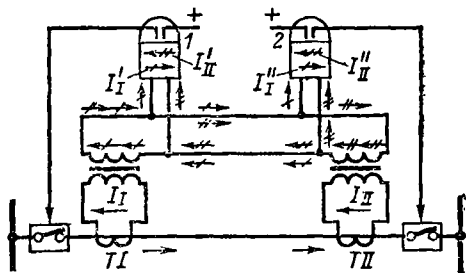


Рис. 10-9. Схема продольной дифференциальной защиты с установкой реле на обоих концах защищаемой линии.

Это достигается механическим или магнитным торможением, которое осуществляется от тока к. з.

В качестве примера на рис. 10-10 показано устройство электромагнитного дифференциального реле с тормозным действием. Реле имеет стальной якорь $Я$ в виде коромысла и два электромагнита: рабочий P и тормозной T . Момент от тока в рабочей обмотке действует на замыкание контактов K , $M_p = k_1 I_p^2 w_p^2$. Момент от тока в тормозной обмотке, действующий на размыкание контактов реле, $M_T = k_2 I_T^2 w_T^2$. Пружина Π создает момент M_Π , противодействующий замыканию контактов.

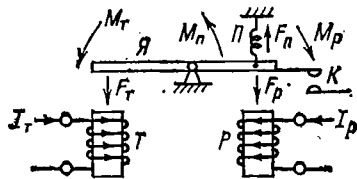


Рис. 10-10. Реле с тормозным действием.

Условием начала работы реле является равенство моментов: $M_p = M_T + M_\Pi$. Если принять $M_\Pi = 0$ и выразить моменты через соответствующие токи, то $k_1 I_p^2 w_p^2 = k_2 I_T^2 w_T^2$. Отсюда ток в рабочей обмотке, необходимый для срабатывания реле, равен:

$$I_p = I_{с.р} = \sqrt{\frac{k_2}{k_1} \frac{w_T}{w_p}} I_T = k_T I_T. \quad (10-7)$$

Из выражения (10-7) следует, что ток срабатывания реле $I_{с.р}$ тем больше, чем больше ток в тормозной обмотке I_T . Коэффициент

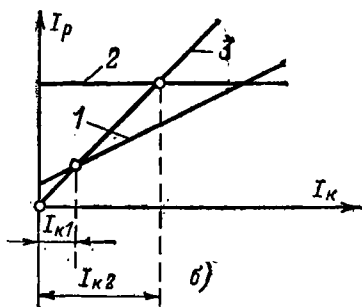
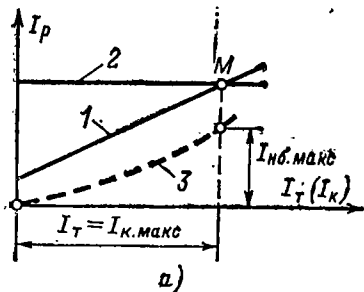


Рис. 10-11. Сравнение работы реле с торможением и без него.

а — при внешнем к. з.; б — при к. з. в зоне.

k_T называется коэффициентом торможения, он зависит от конструктивных особенностей реле (числа витков обмоток w_p и w_T и др.). С учетом момента пружины зависимость $I_{с.р} = f(I_T)$ показана на рис. 10-11.

На рис. 10-12 показана схема включения реле с торможением. Рабочая обмотка включается дифференциально, а тормозная — на ток трансформатора тока в рассечку соединительного провода.

При внешнем к. з. в рабочей обмотке появляется ток небаланса, а в тормозной — ток к. з., под влиянием последнего реле заглубляется и не действует.

При к. з. в зоне как в тормозной, так и в рабочей обмотке реле проходит ток к. з. Соотношение витков w_p и w_T подбирается таким, чтобы рабочий момент в этом случае превосходил момент M_T , благодаря чему реле срабатывает.

В современных дифференциальных линиях применяются тормозные реле на выпрямленном токе (рис. 10-13, а). Реагирующий орган этих реле выполняется с помощью поляризованного реле P , имеющего две обмотки: тормозную w_T и рабочую w_p (рис. 10-13, б). Обмотка w_T включается в плечо дифференциальной защиты через выпрямитель B_T , а рабочая обмотка w_p включается на разность сравниваемых токов через выпрямитель B_p так, чтобы создаваемые ими магнитные потоки Φ_T и Φ_p имели встречное направление.

Реле срабатывает, если поток Φ_p больше Φ_T на величину Φ_{p0} , достаточную для преодоления трения якоря и противодействия полюса S постоянного магнита. Условие срабатывания реле можно

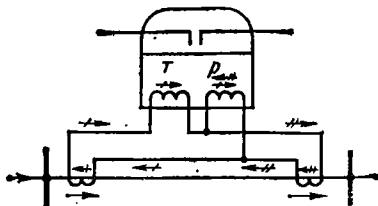


Рис. 10-12. Схема включения реле с торможением.

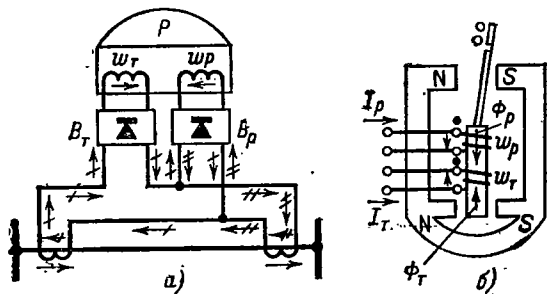


Рис. 10-13. Дифференциальная защита с тормозным реле на выпрямленном токе.

а — схема защиты; б — реагирующий орган.

выразить уравнением $\Phi_p - \Phi_T = \Phi_{p0}$ или $I_p w_p - I_T w_T = I_{p0} w_p$; разделив обе части последнего равенства на w_p , получим ток срабатывания

$$I_{с.р} = I_{p0} + \frac{w_T}{w_p} I_T = I_{p0} + k_T I_T, \quad (10-8)$$

где I_{p0} — ток срабатывания реле при $I_T = 0$; $k_T = w_T/w_p$ — коэффициент торможения.

Графически характеристика срабатывания этого реле представлена на рис. 10-11.

По вертикальной оси координат откладывается рабочий ток I_p , а по горизонтальной — тормозной ток $I_T = I_K$ (см. рис. 10-12). Считая что k_T имеет постоянное значение, зависимость $I_{p.c.p} = f(I_T)$, согласно уравнению (10-8), изображается в виде прямой 1. Ее наклон (и, следовательно, величина k_T) выбираются из условия недействия реле от тока небаланса (кривая 3) при внешнем к. з., т. е. из условия $I_{c.p} > I_{нб}$ при $I_{K, макс}$. Этому условию удовлетворяет точка M на рис. 10-11, а. Соответствующий ей ток в рабочей обмотке

$$I_{p.c.p} = k_n I_{нб. макс} \quad \text{при} \quad I_T = I_{K, макс}, \quad (10-9)$$

где k_n — коэффициент надежности, равный 1,3—1,5.

При применении простого реле (без торможения) его ток срабатывания должен также удовлетворять условию: $I_{c.p} > I_{нб}$.

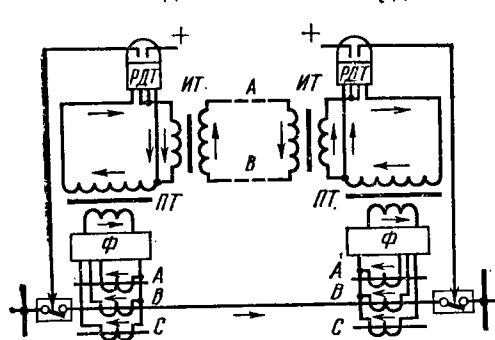


Рис. 10-14. Полная принципиальная схема однофазной дифференциальной защиты линий.

Характеристика этого реле $I_{c.p} = f(I_K)$ изобразится прямой 2, проходящей также через точку M .

Условия работы обоих реле при к. з. в зоне показаны на рис. 10-11, б. При одностороннем питании ток $I_p = I_K$. Этот ток изображается прямой 3, составляющей 45° с осью токов $I_T (I_K)$. Как видно из этой диаграммы, реле с тормозной характеристикой будет срабатывать при токе к. з. I_{K1} меньшем, чем

ток к. з. I_{K2} , при котором срабатывает реле без торможения.

Отсюда следует вывод, что при одинаковых условиях отстройки от $I_{нб}$ при внешнем к. з. (уравнение 10-9) реле с тормозной характеристикой обладает большей чувствительностью по сравнению с простым дифференциальным реле. Таким образом, реле с торможением надежно отстроено от $I_{нб}$ и имеет большую чувствительность при к. з. в зоне по сравнению с реле без торможения.

4. Во всех рассмотренных схемах подразумевалась установка реле на трех фазах в тех случаях, когда защита должна реагировать на все виды к. з. Для выполнения таких схем необходимо шесть дифференциальных реле и не менее четырех соединительных проводов.

Для уменьшения числа реле и соединительных проводов реле включаются через фильтры симметричных составляющих или суммирующие трансформаторы, как показано на принципиальной схеме рис. 10-14.

Помимо уже рассмотренных элементов, в этой схеме предусмотрены разделительные (изолирующие) транс-

форматоры ИТ, с помощью которых цепь соединительного кабеля *АВ* отделяется от цепей реле. Такое разделение исключает появление в цепях реле высоких напряжений, наводимых в жилах кабеля при протекании токов к. з. по защищаемой линии или возникающих в них по любым другим причинам.

В нормальном режиме и при внешних к. з. по соединительным жилам, цепям промежуточного и изолирующего трансформаторов и тормозным обмоткам реле циркулирует ток, пропорциональный первичному току линии, а в рабочих обмотках проходит ток небаланса

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{нб. т.т}} + I'_{\text{нб}}.$$

При к. з. на линии токи в рабочих обмотках суммируются, и хотя в тормозных обмотках реле протекает ток к. з., защита срабатывает, так как действие рабочей обмотки превосходит противодействие тормозной обмотки реле. В соединительных проводах *А* и *В* проходит небольшой ток, равный разности токов $I_{\text{I}} - I_{\text{II}}$.

На практике получили распространение защиты с комбинированными фильтрами прямой и обратной последовательностей или прямой и нулевой последовательностей. Ток (или напряжение) на выходе таких фильтров пропорционален $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$. Составляющая прямой последовательности $\dot{I}_1$ имеется при всех видах к. з.

Слагающая $k\dot{I}_2$ возникает при несимметричных повреждениях (двухфазных и однофазных) и позволяет повысить чувствительность защиты, увеличивая ток в реле. То же самое достигается с помощью слагающей $k\dot{I}_0$, но только при замыканиях на землю. В связи с этим за последнее время отдается предпочтение фильтру $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Отечественная промышленность изготавливает защиту, построенную на основе изложенных выше принципов, типа ДЗЛ с фильтром $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Раньше выпускалась защита типа РДЛ, имевшая аналогичное исполнение, но с фильтром $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$.

10-5. УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ИСПРАВНОСТИ СОЕДИНИТЕЛЬНЫХ ПРОВОДОВ

Повреждения проводов. Повреждение соединительных проводов может вызвать неправильную работу дифференциальной защиты. Возможны обрывы соединительных проводов, короткие замыкания между ними и замыкания на землю одного из проводов.

При обрыве соединительного провода (рис. 10-15, *а*) весь ток, поступающий от трансформаторов тока, замыкается через рабочие обмотки дифференциальных реле. Ток в тормозной и рабочей обмотках реле становится одинаковым, вследствие чего реле может сработать при нормальной нагрузке или сквозном к. з. в зависимости от величины $\dot{I}_{\text{с.з.}}$.

Замыкание между соединительными проводами (рис.10-15, б) шунтирует рабочие обмотки реле, благодаря чему защита может не подействовать и отказать в работе при к. з. в зоне.

Замыкание на землю не нарушает токораспределения и не угрожает поэтому непосредственной опасностью неправильного действия или отказа защиты. Однако если в жилах соединительного кабеля появятся э. д. с., наведенные токами вблизи рас-

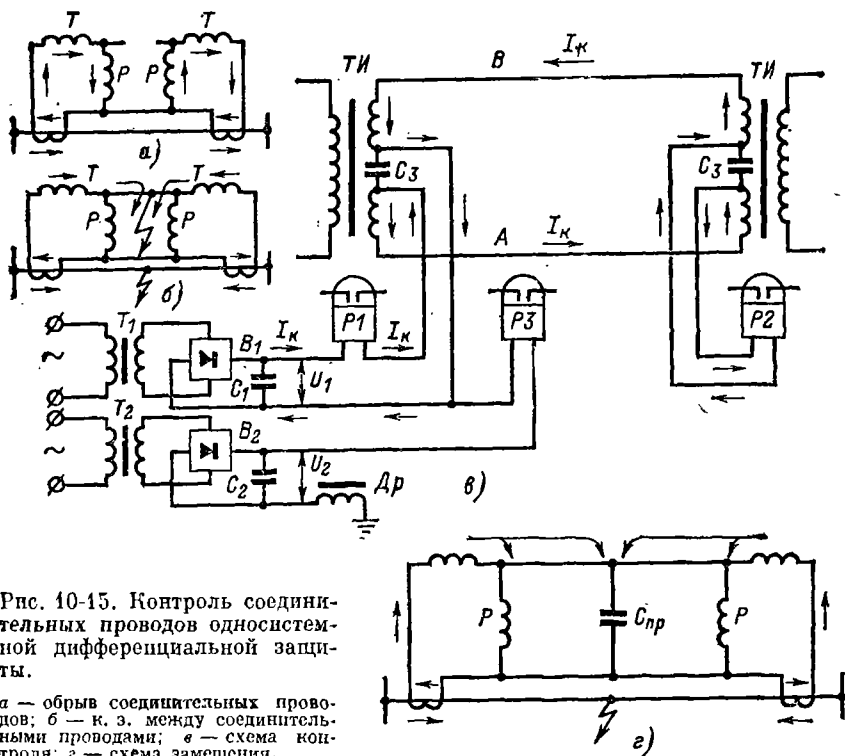


Рис. 10-15. Контроль соединительных проводов однофазной дифференциальной защиты.

а — обрыв соединительных проводов; б — к. з. между соединительными проводами; в — схема контроля; г — схема замещения.

положенных линий электропередачи (§ 10-6), то создаются условия для ложной работы защиты в режиме нагрузки или внешнего к. з.

Устройство контроля. Для повышения надежности защиты ее снабжают устройством, контролирующим исправное состояние соединительных проводов. Устройство контроля может автоматически выводить защиту из действия, разрывая ее цепь отключения при повреждении соединительных проводов, или подавать сигнал о неисправности. Первый способ более надежен.

Получило распространение устройство контроля, основанное на наложении на рабочий переменный ток, протекающий в соединительных проводах защиты, непрерывно циркулирующего кон-

трольного постоянного тока. Принцип выполнения устройства показан на рис. 10-15, а.

К соединительным проводам A и B подводится контрольное напряжение от выпрямителя B_1 , который питается от трансформатора собственных нужд подстанции. Для создания контура для контрольного тока вторичные обмотки изолирующих трансформаторов $ТИ$ на обоих концах линии, состоящих из двух секций, соединяются через конденсатор C_3 . Конденсатор C_3 свободно пропускает переменный ток, но запирает путь постоянному току контроля.

Ток контроля I_k , поступающий от выпрямителя B_1 , замыкается через обмотку реле $P1$, провод A , реле $P2$, провод B и возвращается в выпрямитель, как показано стрелками на рис. 10-15, а. Ток контроля не трансформируется в первичные обмотки трансформаторов $ТИ$ и поэтому не влияет на работу защиты. Под действием этого тока якоря реле $P1$ и $P2$ подтянуты.

При обрыве соединительного провода ток контроля исчезает и оба реле $P1$ и $P2$ срабатывают, подавая сигнал и разрывая оперативную цепь защиты.

При замыкании между проводами A и B обмотка реле $P2$ шунтируется. Ток I_k в реле $P2$ исчезает, и реле срабатывает, подавая сигнал о неисправности и выключая защиту на своем конце линии. Такое действие контроля допустимо, поскольку при возникновении к. з. между соединительными проводами автоматическое отключение защиты не требуется. Обычно нормальное значение контрольного тока $I_k = 5 \div 6$ мА, а напряжения $U_k = 80$ В.

Для сигнализации о замыкании на землю в соединительных проводах предусматривается второй выпрямитель B_2 . Он подключается одним полюсом к соединительным проводам, а вторым — к земле, через заземляющий дроссель D .

При отсутствии замыкания на землю цепь реле $P3$ разомкнута и оно не работает. В случае нарушения изоляции относительно земли одного из проводов под действием напряжения U_2 возникает искусственный ток замыкания на землю I_3 , который проходит через реле $P3$, место повреждения и возвращается в выпрямитель B_2 через землю и дроссель D . Реле $P3$ срабатывает и дает сигнал. Для срабатывания $P3$ нужен ток примерно 0,8 мА. В качестве реле $P1$, $P2$, $P3$ используются поляризованные реле типа РП-7.

Опыт эксплуатации подобных схем показывает, что они работают достаточно надежно и эффективно.

Соединительные провода. Связь между комплектами защиты, расположенными на концах защищаемой линии, осуществляется с помощью бронированного кабеля, прокладываемого по трассе, обеспечивающей его сохранность.

В целях удешевления обычно применяется многожильный кордельный телефонный кабель типа ТЗБ, ТБ или ТЗСБ, используемый одновременно для телефонной связи и телемеханики.

Для обеспечения правильной работы защиты жилы кабеля должны иметь возможно меньшее сопротивление и небольшую емкость. Первое необходимо для ограничения токов небаланса, обусловленных влиянием сопротивления соединительных проводов (§ 10-4), а второе — для повышения чувствительности защиты, так как емкость между жилами и на землю шунтирует рабочую обмотку дифференциального реле и уменьшает поступающий в нее ток при к. з. на защищаемой линии (рис. 10-15, а).

10-6. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ ТИПА ДЗЛ

Дифференциальная защита ДЗЛ [Л. 43] (рис. 10-16) построена на таких же принципах, как и схема, изображенная на рис. 10-14. Она основана на сравнении величины и фазы токов $I_1 + kI_2$

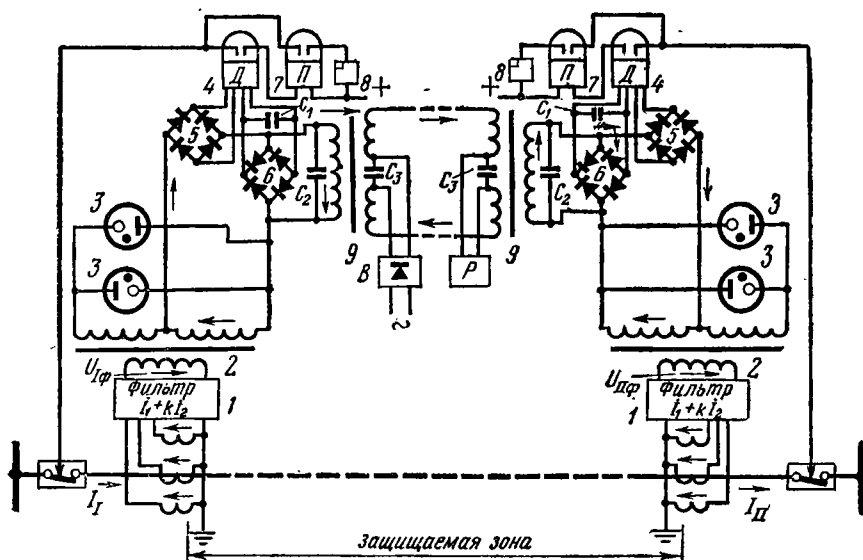


Рис. 10-16. Принципиальная схема защиты ДЗЛ.

на концах защищаемой линии. Защита состоит из двух полуккомплектов, установленных на каждой стороне линии и соединенных с помощью двух жил соединительного кабеля. В каждый полуккомплект защиты ДЗЛ (рис. 10-16) входят следующие элементы: комбинированный фильтр 1 ($I_1 + kI_2$), промежуточный трансформатор 2 со стабилизатором напряжения 3, дифференциальное реле с торможением 4, состоящее из поляризованного реле Д и питающих его выпрямителей 5 и 6, промежуточное реле 7, указательное реле 8 и изолирующий трансформатор 9.

Рассмотрим основные элементы защиты.

Комбинированный активно-индуктивный фильтр $I_1 + kI_2^*$ (рис. 10-17) состоит из трансреактора TP и двух активных сопротивлений R_1 и R_2 .

Трансреактор имеет две первичные обмотки w_1 и w_0 и одну вторичную w_2 . Обмотка w_1 питается током фазы B (I_B), а обмотка w_0 — током $3I_0$, при этом обмотки включены на питающий их ток разной полярности так, чтобы вторичная э. д. с. трансреактора E_T была пропорциональна разности намагничивающих сил: $w_1 I_B - w_0 3I_0$.

Число витков

$$w_0 = \frac{1}{3} w_1.$$

Обозначая сопротивления взаимной индукции между обмотками w_1 и w_2 через x_Φ и учитывая, что э. д. с., индуцированная токами I_B и $3I_0$, отстает от них по фазе на 90° , получаем, что

$$\dot{E}_T = jx_\Phi \dot{I}_B - j\frac{1}{3} x_\Phi 3\dot{I}_0. \quad (10-9)$$

Стальной сердечник TP выполнен с воздушным зазором и не насыщается при вторичных токах к. з. от 0 до 200 А. Это позволяет обеспечить необходимое для правильной работы фильтра постоянство x_Φ и строгую пропорциональность между токами, питающими трансреактор, и его вторичной э. д. с. E_T .

Сопротивление R_1 включено в цепь тока I_A , а R_2 — в цепь тока I_C . Значения этих сопротивлений одинаковы: $R_1 = R_2 = R_\Phi$.

Как следует из схемы фильтра, выходное напряжение E_Φ на зажимах mn равно геометрической сумме: э. д. с. $\dot{E}_T$, напряжения $\dot{I}_A R_1$ и напряжения $\dot{I}_C R_2$, т. е.

$$\dot{E}_\Phi = \dot{E}_T + \dot{I}_A R_1 - \dot{I}_C R_2. \quad (10-10)$$

Напряжение $\dot{I}_C R_2$ взято со знаком минус с учетом того, что токи I_A и I_C в контуре mn направлены встречно. Заменяв E_T выражением (10-9), получим окончательно:

$$\dot{E}_\Phi = j\dot{I}_B x_\Phi + (\dot{I}_A - \dot{I}_C) R_\Phi + j3\dot{I}_0 \frac{x_\Phi}{3}. \quad (10-11)$$

По выражению (10-11) определим, как зависит $\dot{E}_\Phi$ от симметричных составляющих I_1 , I_2 и I_0 полных токов, питающих фильтр. Если допустить, что рассматриваемый фильтр питается токами прямой последовательности, то согласно (10-11)

$$\dot{E}_\Phi = jx_\Phi \dot{I}_{B1} + (\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{C1}) R_\Phi.$$

Из диаграммы фильтра на рис. 10-18, а следует, что $\dot{I}_{A1} - \dot{I}_{C1} = -j\dot{I}_{B1}\sqrt{3}$, с учетом этого

$$\dot{E}_\Phi = jx_\Phi \dot{I}_{B1} - j\dot{I}_{B1} R_\Phi \sqrt{3} = j\dot{I}_{B1} (x_\Phi - R_\Phi \sqrt{3}).$$

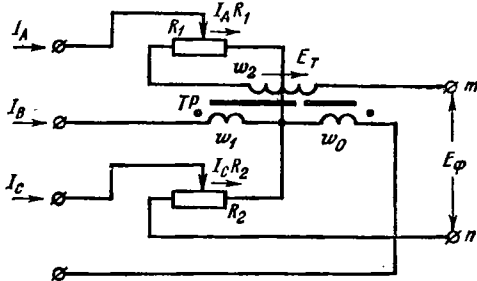


Рис. 10-17. Комбинированный фильтр защиты ДЗЛ $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$.

Принимая $x_\Phi - R_\Phi \sqrt{3} = k_1$, получаем, что на выходе фильтра образуется э. д. с.

$$\dot{E}_{\Phi 1} = j k_1 \dot{I}_{B1}. \quad (10-12)$$

При питании фильтра токами I_2 напряжение на выходе фильтра $\dot{E}_{\Phi 2}$ находится аналогичным методом с учетом диаграммы на рис. 10-18, б:

$$\dot{E}_{\Phi 2} = j x_\Phi \dot{I}_{B2} + (\dot{I}_{A2} - \dot{I}_{C2}) R_\Phi = j x_\Phi \dot{I}_{B2} + j R_\Phi \sqrt{3} \dot{I}_{B2} = j \dot{I}_{B2} (x_\Phi + \sqrt{3} R_\Phi).$$

Принимая $x_\Phi + \sqrt{3} R_\Phi = k_2$, получаем:

$$\dot{E}_{\Phi 2} = j k_2 \dot{I}_{B2}. \quad (10-13)$$

Если к фильтру подводятся токи I_0 (рис. 10-18, в), то на основании (10-9)

$$\dot{E}_{\Phi 0} = j x_\Phi \dot{I}_{B0} - j \frac{1}{3} x_\Phi 3 \dot{I}_0 + (\dot{I}_{A0} - \dot{I}_{C0}) R_\Phi. \quad (10-14)$$

Учитывая, что $\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}$, получаем, что $\dot{E}_{\Phi 0} = 0$. Следовательно, токи I_0 не пропускаются данным фильтром. Как следует из схемы

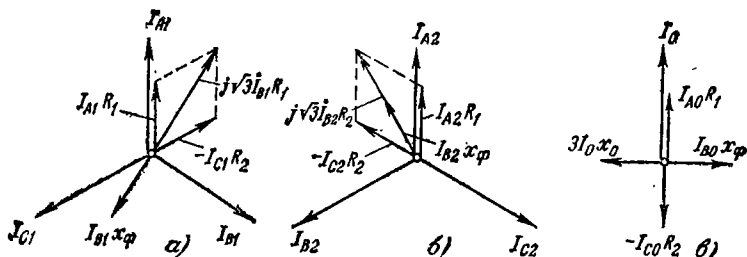


Рис. 10-18. Векторная диаграмма фильтра $I_1 + k I_2$.

и описания фильтра, это достигается встречным включением обмоток w_1 и w_0 трансреактора, выбранным соотношением их витков и встречным включением э. д. с., созданных током $\dot{I}_A$ и $\dot{I}_C$ в выходном контуре m . С учетом (10-13) — (10-12) полная э. д. с. на выходе фильтра, выраженная через симметричные составляющие, будет равна:

$$\dot{E}_\Phi = \dot{E}_{\Phi 1} + \dot{E}_{\Phi 2} + \dot{E}_{\Phi 0} = j k_1 \dot{I}_{B1} + j k_2 \dot{I}_{B2},$$

вынося за скобку k_1 и заменяя k_2/k_1 через k , получаем:

$$\dot{E}_\Phi = j k_1 (\dot{I}_{B1} + k \dot{I}_{B2}). \quad (10-15)$$

Выражение (10-15) показывает, что рассмотренный фильтр действительно является комбинированным фильтром прямой и обратной последовательностей, э. д. с. которого пропорциональна $\dot{I}_1 + k \dot{I}_2$. Из рис. 10-16 видно, что ток в реле защиты 4 определяется величиной выходного напряжения фильтра и поэтому $I_p = k' E_\Phi$. Отсюда следует, что и чувствительность защиты полностью зависит от величины E_Φ . Коэффициент k позволяет повысить влияние токов обратной последовательности на величину E_Φ . Поэтому при увеличении k повышается чувствительность защиты к несимметричным к. з.

Величина и знак k зависят от величин x_{Φ} и R_{Φ} . В этом нетрудно убедиться, если заменить k_1 и k_2 их выражением через x_{Φ} и R_{Φ} : тогда

$$k = \frac{k_2}{k_1} = \frac{x_{\Phi} + \sqrt{3} R_{\Phi}}{x_{\Phi} - \sqrt{3} R_{\Phi}}. \quad (10-16)$$

В защите ДЗЛ принято, что $x_{\Phi} < \sqrt{3} R_{\Phi}$, благодаря этому коэффициент k согласно (10-16) имеет отрицательный знак. Отрицательное k позволяет получить лучшую чувствительность защиты (т. е. большее E_{Φ}) при двухфазном к. з. на землю, чем в случае, когда k положительно.

Промежуточный трансформатор 2 (рис. 10-16) является понизительным трансформатором тока. Вторичная обмотка трансформатора имеет две секции. От одной питается защита, а от второй газонаполненные стабилитроны $СТ1$ и $СТ2$ (рис. 10-19, а). Коэффициент трансформации секции $ПТ$, питающей реле, $n_{ПТ} = I_1/I_2 = 25$.

При некотором определенном напряжении (около 110 В) на вторичной стороне промежуточного трансформатора стабилитроны зажигаются. В результате этого нагрузка трансформатора скачкообразно возрастает, благодаря чему дальнейшее увеличение вторичного напряжения U_2 , а следовательно, и тока I_2 прекращается (рис. 10-19, б).

В схеме предусмотрены два стабилитрона. Один работает при положительной половине напряжения, а второй при отрицательной.

Промежуточный трансформатор в сочетании со стабилитронами выполняет три весьма важные функции:

1) ограничивает напряжение на выпрямителях и соединительных проводах до допустимого для них значения при токах к. з.;

2) ограничивает ток небаланса в дифференциальном реле, поскольку при больших токах к. з. после зажигания стабилитронов ток, поступающий в дифференциальные реле 4 (рис. 10-16), остается неизменным. В этих условиях работа защиты зависит практически только от фазы (направления) сравниваемых токов в начале и конце линии;

3) ограничивает нагрузку на трансформаторы тока. При малых токах (пока не сказывается влияние стабилитронов) нагрузка уменьшается в $n_{ПТ}$ раз за счет коэффициента трансформации промежуточного трансформатора $ПТ$. После зажигания стабилитрона рост тока I_2 в соединительных проводах прекращается.

В связи с этим мощность, потребляемая соединительными проводами ($I_2^2 z_{\text{сп}}$) также перестает расти при увеличении тока в линии.

Дифференциальное реле 4. В качестве дифференциального реле с торможением применено полярizedованное реле, питающееся выпрямленным током. Реле устроено так же, как и реле на рис. 10-13, б.

Выпрямитель тормозной обмотки 5 (рис. 10-16) питается током насыщающегося трансформатора, который определяется током к. з. Выпрямитель рабочей обмотки 6 включен дифференциально, т. е. на разницу токов в начале и конце линии.

Конденсатор C_1 сглаживает пульсацию выпрямленного тока, питающего рабочую обмотку реле, устраняя вибрацию его контактов. В конструкции реле 4 не предусматривается приспособлений для регулировки токов сраба-

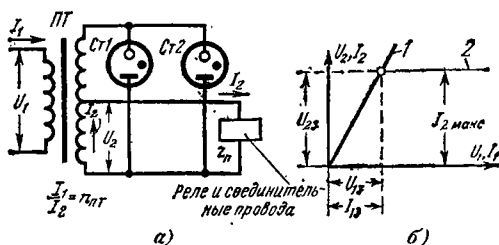


Рис. 10-19. Промежуточный трансформатор.

а — схема; б — характеристика; 1 — при отсутствии стабилитрона; 2 — при наличии стабилитрона.

одолевают сопротивление тормозной цепи и защита действует на отключение.

Ток срабатывания защиты. Из выражения (10-11) следует, что величина тока на входе фильтра, необходимая для создания э. д. с. $E_{\phi} = E_{с.ф.}$, достаточной для срабатывания защиты, зависит от значения x_{ϕ} и R_{ϕ} . Это означает, что изменяя x_{ϕ} и R_{ϕ} , можно регулировать ток срабатывания защиты. Сопротивление x_{ϕ} определяется числом витков обмоток фильтра и может изменяться изменением витков первичной или вторичной обмоток w_1 и w_2 .

В ДЗЛ предусмотрены три ответвления на обмотке w_1 фильтра (рис. 10-17). Соответственно этому можно получить три уставки тока срабатывания, условно выражаемые в относительных единицах коэффициентом h , имеющим три значения: 1; 1,5 и 2. Ток срабатывания h равен 1, когда включены все витки обмотки w_1 . Одновременно с изменением числа витков w_1 предусматривается пропорциональное изменение значений сопротивлений R_1 и R_2 , так чтобы изменение x_{ϕ} не влияло на коэффициент k .

Регулирование k осуществляется изменением сопротивлений R_1 и R_2 (независимо от w_1), при этом x_{ϕ} остается неизменным. Предусмотрены четыре значения k (-4 , -6 , -8 , -10).

Ток срабатывания защиты при одной и той же величине h и k зависит от вида к. з. и поврежденных фаз. Это объясняется тем, что в зависимости от характера повреждения меняются соотношения фазных углов и амплитуд составляющих $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$ в полном токе к. з.

В связи с этим величина E_{Φ} , от которой зависит ток в реле, оказывается различной при разных видах повреждений. Опирируя полными токами к. з. или их симметричными составляющими, можно, пользуясь (10-11) или (10-15) соответственно, определить значения E_{Φ} для разных случаев к. з.

Относительное изменение величины E_{Φ} при разных видах к. з. и одинаковых значениях токов к. з., питающих фильтр, можно характеризовать коэффициентом

$$n = \frac{E_{\Phi(x)}}{E_{\Phi(B)}^{(1)}},$$

где $E_{\Phi(B)}^{(1)}$ — э. д. с. E_{Φ} при однофазном к. з. на фазе B , $E_{\Phi(x)}$ — э. д. с. E_{Φ} при рассматриваемом случае к. з.

Если принять $E_{\Phi(B)}^{(1)}$ равной э. д. с., необходимой для действия дифференциального реле, то $I_{c.з.(x)}$ при рассматриваемом виде повреждения будет в n раз меньше $I_{c.з(B)}$ при к. з. на фазе B , т. е.

$$I_{c.з.(x)} = \frac{I_{c.з(B)}^{(1)}}{n}. \quad (10-17)$$

Согласно заводским данным ток срабатывания защиты на входе фильтра при $h = 1$, $k = -4$ и одностороннем питании к. з. на фазе B равен 3,8 А. С учетом (10-17) значения тока срабатывания для других значений h и k могут быть вычислены по выражению

$$I_{c.з} = \frac{3,8}{n} h, \quad (10-18)$$

где $1/n$ берется из материалов заводской информации по ДЗЛ или [Л. 10].

Выбор уставок защиты сводится к выбору коэффициентов k и h , по которым определяется ток срабатывания защиты $I_{c.з}$ при различных видах к. з., а затем находится коэффициент чувствительности при минимальных значениях I_K при повреждениях на линии.

Коэффициент k выбирается так, чтобы при несимметричных к. з. составляющая kI_2 преобладала над I_1 , обеспечивая величину E_{Φ} , достаточную для действия защиты.

В соответствии с этим исходным для определения k является неравенство $kI_{2B} > I_{1B}$, которое можно преобразовать в равенство, умножив на коэффициент надежности k_n составляющую I_{1B} .

С учетом этого $kI_{2B} = k_n I_{1B}$, откуда

$$k = k_n \frac{I_{1B}}{I_{2B}}.$$

Расчетным является к. з., при котором отношение I_{1B}/I_{2B} имеет наибольшее значение, а угол сдвига фаз между $\dot{I}_{1B}$ и $\dot{I}_{2B}$ — минимальную величину.

Наихудшие угловые соотношения получаются при однофазном к. з. на фазе B , когда $\dot{I}_{1B} = \dot{I}_{2B}$. В этом случае E_{Φ} равно арифметической разности $I_1 - I_2$ и имеет по этой причине наименьшее значение.

Однако за расчетный режим для определения k обычно принимается двухфазное к. з. на землю на защищаемой линии, так как при этом виде повреждения ток I_2 значительно меньше I_1 по величине, хотя сдвиг фаз равен при этом 120° .

Коэффициент h выбирается из условия, чтобы н. с. I_{Bw1} не вызвала насыщения трансреактора. Если вторичный ток $I_{K, \max} < 100$ А, то $h = 1$. При $I_K > 100$, но меньше 150 А, $h = 1,5$. При $I_K > 150$ А $h = 2$.

Вторичный ток срабатывания защиты при одностороннем питании к. з. для разных случаев к. з. вычисляется по формуле (10-18).

10-7. ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Принцип действия защиты прост и надежен. Защита не реагирует на качания и перегрузки и действует без выдержки времени, при коротком замыкании в любой точке линии. К недостаткам защиты следует отнести высокую стоимость соединительного кабеля и работ по его прокладке, а также возможность ложной работы при повреждении соединительных проводов.

При наличии автоматического контроля повреждения кабеля обнаруживаются, как правило, своевременно, и случаи ложной работы защиты по этой причине редки. Защиту следует применять на коротких линиях в тех случаях, когда требуется мгновенное отключение повреждений в пределах всей линии.

Защита получила распространение на линиях 110 и 220 кВ длиной до 10—15 км.

10-8. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ВИДЫ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Поперечные дифференциальные защиты применяются на параллельных линиях, имеющих одинаковое сопротивление, и основаны на сравнении величин и фаз токов, протекающих по обеим линиям. Благодаря равенству сопротивлений линий в нормальном режиме и при внешнем к. з. токи в них равны по величине и фазе ($I_I = I_{II}$) (рис. 10-20).

В случае к. з. на одной из линий равенство токов нарушается. На питающем конце (А) линии токи I_I и I_{II} совпадают по фазе, но различаются по величине, а на приемном* (В) противоположны по фазе, что следует из токораспределения, приведенного на рис. 10-20, б. Таким образом, нарушение равенства токов в параллельных линиях по величине или фазе является признаком повреждения одной из них.

Поперечные дифференциальные защиты применяются двух видов: на параллельных линиях, включенных под один общий выключатель, — токовая поперечная дифференциальная защита, на параллельных линиях с самостоятельными выключателями — направленная поперечная дифференциальная защита.

* Приемным считается конец линии, на котором отсутствует источник питания, или его мощность меньше, чем на питающем конце.

а) Принцип действия защиты

Токковая поперечная дифференциальная защита предназначена для параллельных линий с общим выключателем на обе линии.

При одностороннем питании параллельных линий защита устанавливается только со стороны источника питания, а в сети с двусторонним питанием — с обеих сторон параллельных линий.

Схема защиты для одной фазы изображена на рис. 10-21. На одноименных фазах каждой линии устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации $n_{TI} = n_{TII} = n_T$. Вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются разноименными

зажимами по схеме с циркуляцией токов в соединительных проводах и параллельно к ним включается обмотка токового реле I .

В нормальном режиме и при внешнем к. з. (рис. 10-21, а) ток в реле

$$I_p = I_{вI} - I_{вII} = \frac{I_I}{n_T} - \frac{I_{II}}{n_T}. \quad (10-19)$$

В этих режимах $I_I = I_{II}$, поэтому при отсутствии погрешностей у трансформаторов тока $I_p = 0$ и защита не работает. Следовательно, по своему принципу действия рассматриваемая защита не реагирует на внешние к. з., нагрузку и качания. Поэтому ее выполняют без выдержки времени и не отстраивают от токов нагрузки. В действительности в реле протекает ток небаланса $I_{нб}$, вызванный погрешностью трансформаторов тока ($I'_{нб}$) и некоторым различием первичных токов ($I''_{нб} = \frac{I_I - I_{II}}{n_T}$), обусловленным неточным равенством сопротивлений линии. Ток срабатывания реле $I_{с.р}$ должен быть больше максимального тока небаланса:

$$I_{с.р} > (I'_{нб} + I''_{нб}). \quad (10-20)$$

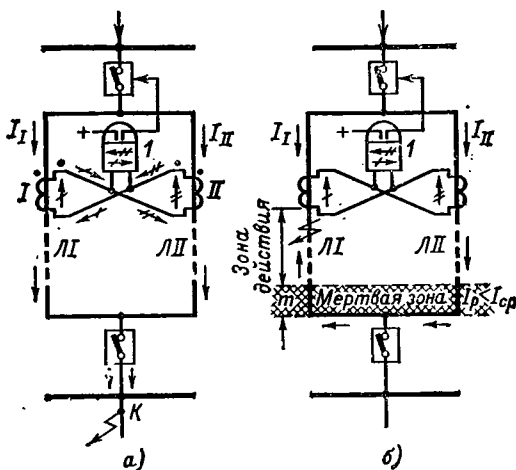


Рис. 10-21. Принцип действия токовой поперечной дифференциальной защиты.

а — режим нагрузки и внешнего к. з.; б — режим к. з. на одной линии ЛЛ.

В случае повреждения одной из параллельных линий, например $ЛІ$ (рис. 10-21, б), ток I_I в поврежденной линии становится больше тока во второй линии ($I_I > I_{II}$). Баланс токов в дифференциальном реле нарушается, и в реле появляется ток

$$I_p = I_{вI} - I_{вII} = \frac{I_I - I_{II}}{n_T}. \quad (10-21)$$

При токе в реле $I_p > I_{с.р}$ защита действует и отключает общий выключатель обеих линий.

б) Мертвая зона защиты

При удалении точки к. з. K от места установки защиты (рис. 10-22, а) соотношение токов I_I и I_{II} по поврежденной и неповрежденной линиям изменяется. Эти токи направляются к точке K

по двум параллельным ветвям и распределяются по ним обратно пропорционально их сопротивлениям z_I и z_{II} :

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{z_{II}}{z_I},$$

где $z_I = z_n - z_{BK}$, а $z_{II} = z_n + z_{BK}$.

При перемещении точки K в сторону подстанции B сопротивление z_I растет, а z_{II} снижается, соответственно этому I_I уменьшается, I_{II} увеличивается, а ток в реле защиты $I_p = I_I - I_{II}$ постепенно понижается и при к. з. на шинах B становится равным нулю (рис. 10-22, б). В результате этого, при повреждениях на некотором участке вблизи подстанции B (рис. 10-22, а и б) ток I_p оказывается меньше тока срабатывания защиты $I_{с.з}$ и она перестает работать. Границей действия защиты является точка к. з., отстоящая от шин противоположной подстанции B на расстоянии m , где $I_p = I_{с.з}$ (рис. 10-22, б). Таким образом, защита, регулирующая на разность токов параллельных линий $I_I - I_{II}$, не может охватить своей зоной действия защищаемые линии полностью.

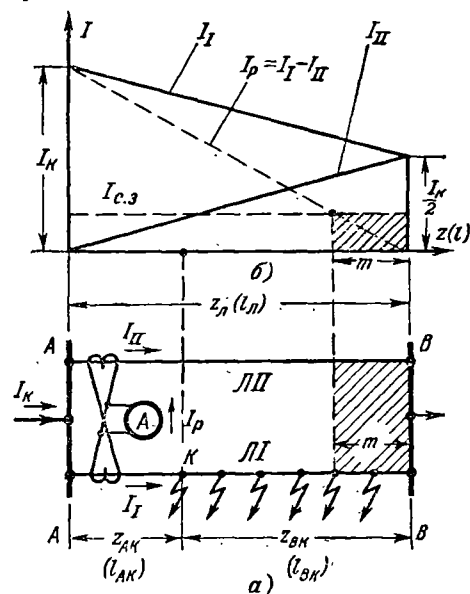


Рис. 10-22. Мертвая зона токовой поперечной дифференциальной защиты.

z_n и l_n — сопротивление и длина линии; z_{AK} и z_{BK} — сопротивление от шин A и B до точки к. з. K .

Ток I_p оказывается меньше тока срабатывания защиты $I_{с.з}$ и она перестает работать. Границей действия защиты является точка к. з., отстоящая от шин противоположной подстанции B на расстоянии m , где $I_p = I_{с.з}$ (рис. 10-22, б). Таким образом, защита, регулирующая на разность токов параллельных линий $I_I - I_{II}$, не может охватить своей зоной действия защищаемые линии полностью.

Часть линий вблизи шин противоположной подстанции не охватывается защитой из-за недостаточной величины тока в реле, вследствие уменьшения различия в величине токов I_I и I_{II} , на разность которых реагирует защита.

Участок m линий (вблизи шин противоположной подстанции) при к. з., в пределах которого ток в защите недостаточен для ее срабатывания, называется мертвой зоной защиты.

Наличие мертвой зоны является существенным недостатком поперечной дифференциальной защиты. Для отключения к. з. в мертвой зоне требуется дополнительная защита.

Длина мертвой зоны m определяется на основе следующих соображений. Токи по линиям II и III (рис. 10-22) обратно пропорциональны сопротивлениям или длинам ветвей от шин, где установлена защита, до точки к. з. При к. з. на границе мертвой зоны в точке M

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{l+m}{l-m},$$

где l — длина линий.

Преобразуя это выражение, найдем: $m(I_I + I_{II}) = l(I_I - I_{II})$. Учитывая, что $I_I + I_{II} = I_K$ и что при к. з. на границе мертвой зоны ток в реле равен $I_I - I_{II} = I_{с.з.}$, получаем:

$$mI_K = lI_{с.з.}$$

откуда длина мертвой зоны

$$m = \frac{I_{с.з.}}{I_K} l. \quad (10-22)$$

Для упрощения расчета мертвой зоны ток I_K определяется при к. з. на шинах противоположной подстанции, а не на границе мертвой зоны.

Защиту принято считать эффективной, если мертвая зона ее не превосходит 10%.

При отключении одной из параллельных линий поперечная дифференциальная защита превращается в мгновенную максимальную защиту оставшейся в работе линии и действует неселективно. Поэтому при отключении одной линии поперечная дифференциальная защита должна выводиться из действия.

в) Схема защиты

В сетях с малым током замыкания на землю защита выполняется на двух фазах. В сетях с большим током замыкания на землю защита устанавливается на трех фазах. В этом случае трансформаторы тока на каждой линии соединяются по схеме полной звезды с нулевым проводом.

Для отключения защиты при отключении одной из параллельных линий устанавливается отключающее устройство (ОУ, рис. 10-23). В дополнение к отключающему устройству можно

предусматривать автоматическое отключение защиты посредством блок-контактов B_I и B_{II} на разъединителях. При отключении одного из разъединителей его блок-контакт разрывает цепь, по которой подается плюс к защите.

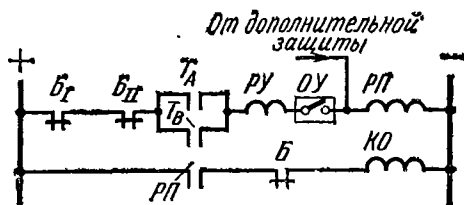


Рис. 10-23. Схема цепей постоянного тока токовой двухфазной поперечной дифференциальной защиты.

T_A , T_B — токковые реле, включенные в фазы А и В; $РП$ — промежуточное реле; $РУ$ — указательное реле; $ОУ$ — отключающее устройство; B_I и B_{II} — блок-контакты разъединителей первой и второй линии; $Б$ — блок-контакт в цепи отключающей катушки $КО$.

параллельных линиях необходимо дополнительную защиту, действующую при к. з. на шинах противоположной подстанции, в мертвой зоне, а также при выводе из работы одной линии.

10-10. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия

Направленная поперечная дифференциальная защита применяется на параллельных линиях с самостоятельными выключателями на каждой линии (рис. 10-24). К защите таких линий предъявляется требование — отключать только ту из двух линий, которая повредилась. Для выполнения этого требования токовая поперечная дифференциальная защита дополняется реле направления мощности двустороннего действия (рис. 10-24) или двумя реле направления мощности одностороннего действия, каждое из которых предназначается для отключения только одной линии.

Упрощенная принципиальная схема одной фазы защиты дана на рис. 10-24.

Токковые цепи защиты выполняются так же, как и у токовой поперечной дифференциальной защиты (см. § 10-9). Токковые обмотки реле мощности 2 и токового реле 1 соединяются последовательно и включаются параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока на разность токов параллельных линий, т. е. так, чтобы ток в реле $I_p = I_I - I_{II}$. Токковые реле 1 выполняют функ-

Оценка защиты. Токвая поперечная дифференциальная защита относится к числу простых и надежных. Важным достоинством ее является быстродействие. Защита не реагирует на токи качания.

Недостатками защиты являются наличие мертвой зоны и необходимость отключения защиты при выключении одной параллельной линии.

Кроме поперечной дифференциальной защиты, на

предусматривать дополни-

ции пусковых реле защиты. Реле направления мощности 2 служит для выявления поврежденной линии.

Напряжение к реле подводится от трансформатора напряжения шин подстанции. Оперативный ток к защите подается через блок-контакты выключателей B_I и B_{II} , назначение которых поясняется ниже.

При срабатывании пускового реле 1 плюс постоянного тока подводится к реле направления мощности 2. Последнее замыкает верхний или нижний контакт, в зависимости от того, какая из двух линий повреждена. От контакта K_1 подается импульс на отключение выключателя линии $ЛI$, а от контакта K_2 — линии $ЛII$. Для двустороннего отключения поврежденной линии защита устанавливается с обеих сторон параллельных линий.

Рассмотрим поведение защиты при к. з., нагрузке и качаниях.

Внешние к. з. При внешних к. з. (точка K на рис. 10-24), а также при нагрузке и качаниях первичные токи I_I и I_{II} равны по величине и совпадают по направлению (см. § 10-9) на обоих концах линий.

Вторичные токи I_{BI} и I_{BII} (рис. 10-24) направлены в цепи обмоток реле навстречу друг другу, поэтому ток в реле $I_p = I_{BI} - I_{BII}$. При равенстве n_I и n_{II} и идеальной работе трансформаторов тока $I_{BI} = I_{BII}$, а $I_p = 0$. Это означает, что при внешних к. з., нагрузке и качаниях рассматриваемая защита (как и любая другая дифференциальная защита) не действует.

Однако вследствие погрешности трансформаторов тока и некоторого неравенства сопротивлений линий вторичные токи I_{BI} и I_{BII} несколько различаются по величине и фазе, в результате чего в реле появляется ток небаланса $I_p = I_{нб}$.

Для исключения работы защиты при внешних к. з. ее ток срабатывания должен удовлетворять условию $I_{с.з.} > I_{нб}$.

Короткое замыкание на параллельных линиях ($ЛI$ и $ЛII$). На рис. 10-25, а и б показано распределение первичных и вторичных токов при к. з. на линии $ЛI$ и $ЛII$.

На питающем конце (подстанция А) в случае повреждения на линии $ЛI$ или $ЛII$ первичные токи I_I и I_{II} имеют оди-

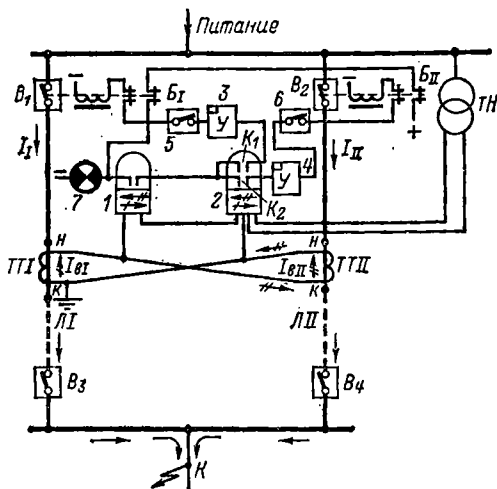


Рис. 10-24. Упрощенная схема и принцип действия направленной поперечной дифференциальной защиты параллельных линий.

наковое направление. При этом, как видно из рис. 10-25, вторичные токи в защите питающего конца направлены в обмотках реле встречно, и поэтому ток

$$I_p = I_{BI} - I_{BII}. \quad (10-22a)$$

Токи I_I и I_{II} различаются по величине, в поврежденной линии ток всегда больше, чем в неповрежденной, так как сопротивление от шин A до точки к. з. K для тока поврежденной линии меньше, чем для неповрежденной. Поэтому разность $(I_{BI} - I_{BII}) > 0$, и при к. з. на любой из двух линий в реле появляется ток. Направление и знак этого тока зависят от того, какая линия повреждена.

При к. з. на II (рис. 10-25, a) $I_{BI} > I_{BII}$, ток I_p направлен в сторону большого тока, которым является вторичный ток поврежденной линии I_{BI} . Согласно (10-22a) ток I_p имеет положительный знак.

При к. з. на III (рис. 10-25, b) $I_{BII} > I_{BI}$, в отличие от предыдущего случая ток I_p согласно (10-22a) имеет отрицательный знак и направлен в сторону большого тока, т. е. тока поврежденной линии I_{BII} .

На приемном конце (подстанция B) первичные токи I_I и I_{II} имеют противоположные направления.

Рис. 10-25. Токораспределения в поперечной дифференциальной защите при к. з.

a — на II ; b — на III .

На поврежденной линии ток идет от шин подстанции B , а на неповрежденной к шинам B (см. рис. 10-25, a и b). В соответствии с этим ток в реле на приемном конце равен:

$$I_p = I_{BI} + I_{BII}. \quad (10-22b)$$

как это следует из токораспределений на рис. 10-25, a и b . Знак тока I_p зависит от того, какая линия повреждена: II или III . При к. з. на II ток к. з. идет к месту повреждения (точке K) из линии III в линию II (рис. 10-25, a). В соответствии с этим ток в реле I_p (рис. 10-25, b) будет, так же как и на питающем конце, положительным, совпадая по знаку со вторичным током поврежденной линии II .

В случае повреждения на III направление первичного тока к. з. изменится, он будет идти из линии II в линию III , где находится повреждение (рис. 10-25, b). Соответственно изменится направление вторичных токов и тока I_p , знак которого станет отрицательным.

Из сказанного следует, что при к. з. на любой из параллельных линий в поперечной направленной дифференциальной защите появляется ток I_p и она приходит в действие. При к. з. на $ЛI$ ток I_p имеет положительное направление, а при повреждении $ЛII$ направлен в обратную сторону.

Поскольку ток в поляризирующей цепи реле мощности, питаемой напряжением шин, в обоих случаях имеет одинаковое направление, то знак мощности S_p на зажимах реле направления мощности при к. з. на $ЛI$ и на $ЛII$ будет различным.

Для большей наглядности на рис. 10-26 приведены векторные диаграммы тока I_p и напряжения U_p , подводимых к реле мощности. При построении диаграмм принято, что положительные токи отстают от U_p на угол $\varphi_p = \varphi$, а отрицательные сдвинуты на угол $\varphi_p = \varphi + 180^\circ$.

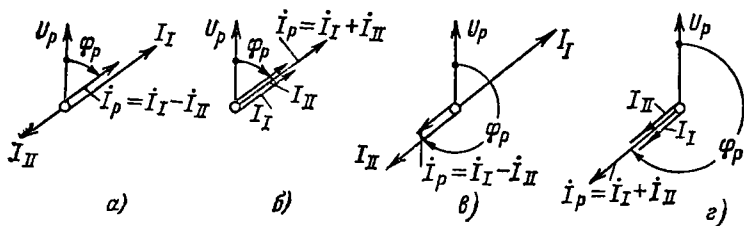


Рис. 10-26. Векторные диаграммы $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$ на реле мощности.

а — при к. з. на $ЛI$ на питающем конце; б — то же на приемном конце; в — при к. з. на $ЛII$ на питающем конце; г — то же на приемном конце.

Если при к. з. на $ЛI$ (рис. 10-26, а и б) мощность на реле была положительна, то при повреждении на $ЛII$ (рис. 10-26, в и г) знак мощности изменится на обратный за счет изменения фазы тока I_p на 180° .

Поэтому если в первом случае реле мощности замыкает контакт K_1 , разрешая защите подействовать на отключение поврежденной линии $ЛI$, то во втором случае реле мощности замыкает контакт K_2 и разрешит отключение линии $ЛII$ (рис. 10-24).

При наличии источников питания на приемной стороне характер распределения первичных токов, показанный на рис. 10-25, не меняется, и поэтому поведение защиты будет аналогичным.

Таким образом, при к. з. на одной из параллельных линий под действием тока I_p срабатывают пусковые реле защиты, подводя оперативный ток к реле направления мощности. Последнее по знаку S_p определяет поврежденную линию и замыкает цепь отключения ее выключателя.

Автоматическая блокировка защиты. Оперативная цепь защиты заводится последовательно через блок-контакты B_I и B_{II} выключателей линии $ЛI$ и $ЛII$ (рис. 10-24).

При отключении выключателя блок-контакт размыкает оперативную цепь и автоматически выводит из действия защиту. Такое

выполнение оперативной цепи необходимо для правильной работы защиты в следующих двух случаях:

1. Если при к. з. на линии, например $ЛІ$ (рис. 10-24), выключатель B_1 отключится раньше выключателя B_3 , то реле мощности защиты подстанции A под действием тока к. з., направляющегося к месту повреждения по линии $ЛІІ$, разрешит защите подстанции A отключить неповрежденную линию $ЛІІ$. Такое неправильное действие защиты предотвращается посредством блок-контакта B_1 , автоматически размыкающего оперативную цепь защиты при отключении выключателя B_1 (рис. 10-24).

Непременным условием надежности блокировки является регулировка блок-контактов так, чтобы получить $t_{бл} < t$ отключения выключателя.

2. При отключении одной из линий защита превращается в мгновенную направленную защиту. Она может неправильно работать при внешних к. з. и поэтому должна выводиться из действия.

Это осуществляется с помощью блок-контактов, снимающих плюс с защиты при отключении выключателя линии.

При отключении одной из линий с противоположной стороны (например, на подстанции B) автоматическая блокировка на защите подстанции A не действует; в этом случае защита должна отключаться вручную отключающими устройствами 5 и 6 (рис. 10-24).

Состояние блок-контактов контролируется лампой 7 (рис. 10-24), которая горит, если контакты B_I и B_{II} замкнуты.

Зона каскадного действия.

В § 10-9, 6 было показано, что разница токов в параллельных линиях $I_I - I_{II}$ уменьшается

Рис. 10-27. Зона каскадного действия направленной поперечной дифференциальной защиты.

при удалении точки к. з. от места установки защиты (см. рис. 10-22, б). В результате этого каждый комплект направленной поперечной дифференциальной защиты так же, как и у токовой дифференциальной защиты, имеет m (рис. 10-27) при к. з., в пределах которой ток $I_p < I_{с.з.}$, вследствие чего этот комплект защиты не может сработать. Однако после отключения поврежденной линии с противоположной стороны не работавшая до этого защита приходит в действие и отключает поврежденную линию. Так, например, при к. з. на $ЛІ$ в точке K вблизи шин подстанции B защита A не работает, так как $I_p < I_{с.з.}$. После отключения поврежденной линии $ЛІ$ со стороны подстанции B (где ток I_p достаточен для надежного действия поперечной дифференциальной защиты B) весь ток I_K направится от подстанции A к месту повреждения K по $ЛІ$. В этом случае $I_I = I_K$, $I_{II} = 0$, а ток в пусковых реле

защиты A резко возрастает: $I_p = I_I - I_{II} = I_K$ и станет больше $I_{с.з.}$.

Пусковые реле защиты A срабатывают, орган направления мощности выбирает поврежденную линию II , и защита действует на ее отключение.

При к. з. вблизи шин подстанции A отключение поврежденной линии происходит аналогично: сначала работает ближняя к месту к. з. защита A , а затем защита B .

Такое поочередное действие защит называется каскадным, а зона (m_A и m_B), в пределах которой $I_p < I_{с.з.}$, вследствие чего направленная дифференциальная защита не действует, пока поврежденная линия не отключится с противоположной стороны, называется зоной каскадного действия защиты.

Зона каскадного действия определяется на основе таких же соображений, как и мертвая зона по выражению (10-22). При каскадном действии защиты полное время включения к. з. удваивается, что является недостатком защиты, поэтому зону каскадного действия стремятся сократить, для чего следует уменьшать $I_{с.з.}$.

Мертвая зона по напряжению. При к. з. вблизи места установки защиты остаточное напряжение U_p , подводимое к зажимам реле мощности, очень мало (см. рис. 7-6), а при к. з. у шин подстанции оно равно нулю. В этом случае мощность на зажимах реле направления мощности оказывается недостаточной для его действия и защита отказывает в работе. Таким образом, направленная поперечная дифференциальная защита имеет мертвую зону по напряжению. Величина мертвой зоны невелика, она определяется расчетом, как указано в § 7-7.

Работа защиты при обрыве провода линии с односторонним заземлением. На рис. 10-28 показано протекание тока к. з. при обрыве одного провода линии и заземлении его с одной из сторон. Направленная поперечная дифференциальная защита A под действием тока в линии II отключает поврежденную линию. Одновременно от тока к. з. в линии III срабатывает защита B и неправильно отключает неповрежденную линию III . Устранение этого недостатка защиты требует усложнения схемы. Опыт эксплуатации показывает, что рассмотренный вид повреждения бывает редко, поэтому специальных мер к устранению неправильной работы защиты обычно не применяют.

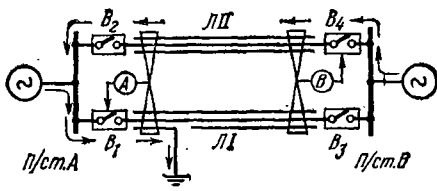


Рис. 10-28. Неправильное действие направленной поперечной дифференциальной защиты при обрыве одного провода с односторонним заземлением.

6) Схемы направленной поперечной дифференциальной защиты

Схемы защиты выполняются с учетом следующих общих положений:

1. Трансформаторы тока на каждой линии соединяются по схеме полной звезды для трехфазных защит и по схеме неполной звезды — для двухфазных.

2. Реле мощности включается на ток и напряжение по типовым схемам, обеспечивающим наиболее благоприятные условия для их работы (по 90-градусной схеме — при реле мощности смешанного типа).

3. Пуск защиты производится пофазно. При каскадном отключении поврежденной линии (рис. 10-27) реле мощности под действием токов нагрузки неповрежденных фаз неповрежденной

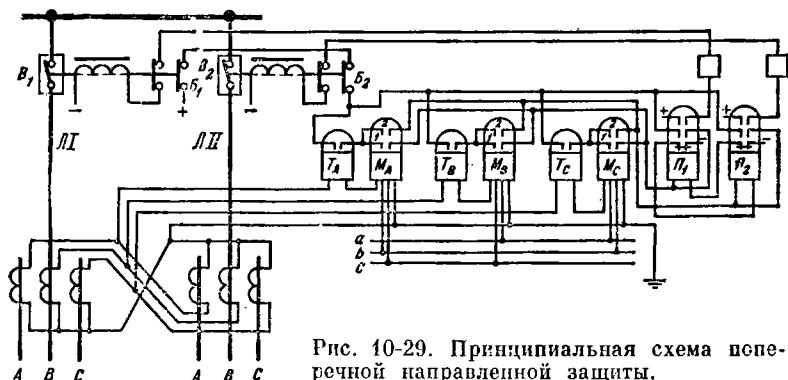


Рис. 10-29. Принципиальная схема поперечной направленной защиты.

линии ЛІІ могут замкнуть цепь на отключение этой линии. При пофазном пуске реле мощности, включенные на ток неповрежденных фаз, не получают оперативного тока и не смогут вследствие этого подействовать на отключение.

4. Защита выполняется без выдержки времени, поскольку она не действует при внешних к. з.

5. В случае обрыва или перегорания предохранителя в цепи напряжения к реле мощности подводится искаженное по фазе и величине напряжение и реле может неправильно подействовать при к. з. на одной из параллельных линий. Поэтому предусматривается устройство контроля исправности цепи напряжения.

На рис. 10-29 приведена в качестве примера схема трехфазной защиты.

В схеме имеются три пусковых токовых реле T_A , T_B и T_C , включенных на разность токов соответствующих одноименных фаз ЛІ и ЛІІ. В качестве органов направления мощности используются реле мощности M_A , M_B , M_C двустороннего действия типа РБМ-271, момент этого реле $M_A = k U_{PI} I_P \cos(\varphi_P + 90^\circ)$. Реле имеют по два контакта. Контакт 1 (нижний) замыкается при положительном знаке мощности, а контакт 2 (верхний) — при отрицательном.

Токовые обмотки реле M включаются последовательно с обмотками пусковых реле на ток фазы. Обмотки напряжения включены на линейное напряжение по 90-градусной схеме.

Плюс на оперативные цепи защиты подается через блок-контакты B_1 и B_2 выключателей B_1 и B_2 линий $Л I$ и $Л III$, чем осуществляется автоматическая блокировка защиты при отключении одного из выключателей. Контакты пусковых реле подают плюс к реле мощности, включенному на ток одноименной фазы, т. е. T_A — к реле M_A , T_B — к реле M_B , T_C — к реле M_C .

В схеме предусматриваются два выходных промежуточных реле. Реле P_1 пускается от контактов 1 реле M при к. з. на линии $Л I$ и действует на отключение выключателя B_1 . Реле P_2 пускается от верхних контактов 2 реле M при к. з. на линии $Л III$ и отключает B_2 .

В схеме предусмотрена взаимная блокировка этих реле. С этой целью минус обмотки P_1 заведен через нормально замкнутые контакты P_2 , и наоборот.

Оба реле, срабатывая, самоудерживаются, подавая питание на обмотку через один из своих контактов. При наличии такой блокировки отпадает необходимость в регулировке блок-контактов B_1 и B_2 , обеспечивающей их размыкание раньше, чем прервется ток к. з. силовыми контактами выключателя.

Таким путем обеспечивается надежность автоматической блокировки защиты при каскадных отключениях поврежденной линии.

Рассмотренная трехфазная схема применяется в сети с большим током замыкания на землю от всех видов к. з.

В сети с малым током замыкания на землю, а также и в сети с глухозаземленной нейтралью при наличии поперечной дифференциальной защиты нулевой последовательности применяется **д в у х ф а з н а я с х е м а**, отличающаяся от рассмотренной отсутствием трансформаторов тока, пусковых реле и реле мощности на одной фазе (например B).

в) Выбор уставок направленной поперечной дифференциальной защиты, включенной на фазные токи (рис. 10-24)

Ток срабатывания пусковых реле защиты должен удовлетворять четырем требованиям:

1. *Пусковые реле не должны действовать от тока небаланса $I_{нб}$, возникающего при внешних к. з.*

Для этого их ток срабатывания должен выбираться больше максимального тока небаланса при к. з. на шинах противоположной подстанции (рис. 10-24)

$$I_{с.з.} = k_n I_{нб. макс}, \quad (10-23)$$

где $k_n = 1,5 \div 2$.

2. *Пусковые реле должны быть отстроены от суммарного тока нагрузки $I_{н. макс}$ параллельных линий для предотвращения ложного действия защиты при отключении одной из линий с противоположной стороны в нормальном режиме (рис. 10-30, а).* В таких условиях по оставшейся в работе линии $Л III$ протекает суммарный ток $I_{н. макс}$ обеих параллельных линий, который поступает в пусковые реле и реле мощности.

Если нагрузка передается от шин A в сторону линии, то реле мощности срабатывает, разрешая защите отключить оставшуюся линию. Чтобы не допустить такого отключения, необходимо иметь: $I_{с.з} > I_{н. макс}$, или

$$I_{с.з} = k_H I_{н. макс}, \quad (10-24)$$

где k_H — коэффициент надежности.

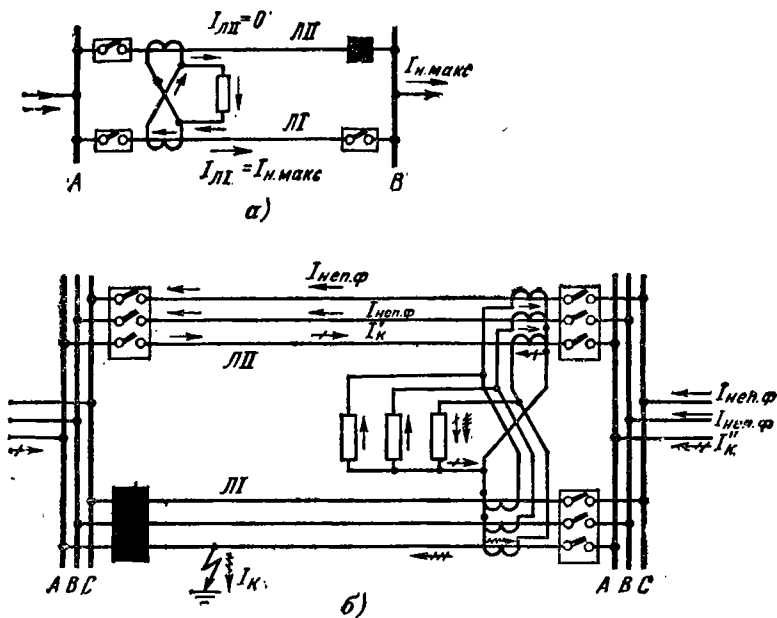


Рис. 10-30. Токораспределение в защите при каскадном отключении поврежденной линии с учетом токов нагрузки.

3. Пусковые реле должны отстраиваться от токов в неповрежденных фазах $I_{нep.ф}$ при двухфазных и однофазных к. з. Для этой цели

$$I_{с.з} > I_{нep.ф}$$

или

$$I_{с.з} = k_H I_{нep.ф}, \quad (10-25)$$

где

$$I_{нep.ф} = I_n + k I_K.$$

Токи в неповрежденных фазах (B и C) влияют на работу защиты при каскадном отключении поврежденной линии (рис. 10-30, б), так как в этом режиме они текут только по одной оставшейся в работе линии ЛII.

При выполнении условия (10-25) и пофазном пуске защиты неселективное отключение линии из-за ложной работы реле мощ-

ности исключается, поскольку пусковые реле неповрежденных фаз не будут работать.

4. Пусковые реле должны надежно возвращаться при максимальной нагрузке параллельных линий. При выборе тока срабатывания без учета условий возврата контакты пусковых реле могут остаться замкнутыми после внешнего к. з. (при работе одной линии, когда защита превращается в мгновенную максимальную защиту). Если при этом под действием нагрузки сработает реле направления мощности, то цепь отключения от защиты будет разомкнута только блок-контактом отключенного выключателя. В момент включения второго выключателя блок-контакт замкнется и защита подаст импульс на отключение работающей линии.

Условия возврата обеспечиваются, если

$$I_{с.з} = \frac{k_n I_{н. макс}}{k_{воз}}, \quad (10-26)$$

где $I_{н. макс}$ — суммарный максимальный ток нагрузки параллельных линий.

Ток срабатывания, выбранный по четвертому условию, обычно удовлетворяет всем остальным требованиям. Поэтому расчет $I_{с.з.}$ ведется по формуле (10-26) и проверяется по (10-23) и (10-25).

Ток небаланса поперечной дифференциальной защиты (см. § 10-9) принимается равным арифметической сумме тока небаланса $I'_{нб}$, обусловленного погрешностью трансформаторов тока, и тока небаланса $I''_{нб}$, вызванного неравенством сопротивлений параллельных линий. При выборе уставок по выражению (10-23) необходимо исходить из максимального значения суммарного тока небаланса:

$$I_{нб. макс} = I'_{нб. макс} + I''_{нб. макс}. \quad (10-26a)$$

Для уменьшения $I'_{нб}$ трансформаторы тока, питающие защиту, выбираются по кривым предельной кратности или 10%-ной погрешности при максимальном значении тока внешнего к. з. на шинах противоположной подстанции, текущего по каждой параллельной линии $I_{к. макс}$. Расчетная кратность тока

$$m_p = \frac{k_a I_{к. макс}}{I_{ном. т. т}}, \quad (10-27)$$

где k_a — коэффициент, учитывающий влияние апериодической составляющей тока к. з., принимается равным 2.

Согласно [Л. 99] рекомендуется оценивать приближенное значение $I'_{нб}$ по выражению

$$I'_{нб. макс} = k_{одн} 0,1 k_a \frac{I_{к. макс}}{n_t}, \quad (10-28)$$

где $I_{к. макс}$ — максимальный ток при трехфазном к. з. на шинах подстанций (А и В), проходящий по одной параллельной линии при работе обеих; 0,1 — погрешность трансформаторов тока, равная 10%; $k_{одн}$ — коэффициент однотипности, принимаемый при

однотипных трансформаторах тока и равных сопротивлениях плеч равным 0,5; k_a — принимается равным 1,5—2.

Вторую составляющую тока небаланса $I'_{нб}$ можно оценивать по формуле

$$I'_{нб, макс} = \frac{\Delta z\%}{100} \frac{k_a I_{к, макс}}{n_T}, \quad (10-29)$$

где $\Delta z\% = \frac{z_{ЛI} - z_{ЛII}}{z_{ЛI}} 100$ — разница в процентах между сопротивлениями $z_{ЛI}$ и $z_{ЛII}$ прямой последовательности обеих линий;

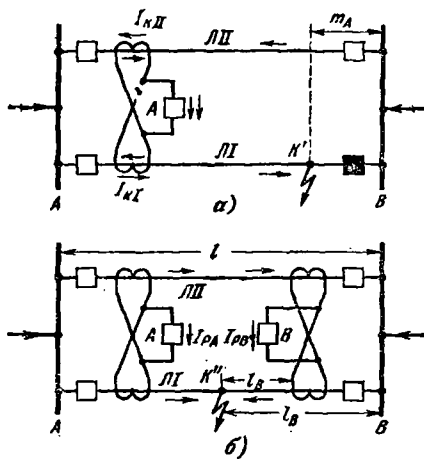


Рис. 10-31. Расчетные схемы для проверки чувствительности поперечной дифференциальной защиты.

а — при каскадном отключении поврежденной линии; б — при к. з. в точке равной чувствительности K'' .

$I_{к, макс}$ — максимальное значение суммарного тока к. з. (по обеим линиям) при повреждении на шинах противоположной подстанции.

Обычно сопротивление линий одинаково ($z_{ЛI} = z_{ЛII}$). В таких случаях считается, что $I'_{нб} = 0$ и в расчетах учитывается только составляющая $I'_{нб}$.

Чувствительность защиты характеризуется величиной зоны каскадного действия защиты, коэффициентом чувствительности пусковых реле $k'_ч$ и величиной мертвой зоны по напряжению у реле мощности защиты [Л. 105].

Зона каскадного действия подсчитывается для защиты на каждом конце параллельных линий по (10-22) и не должна превышать 25% длины линии.

Чувствительность пусковых реле защиты проверяется для двух случаев:

а) При к. з. в точке K' на границе зоны каскадного действия защиты А (рис. 10-31, а) после отключения поврежденной линии ЛI с противоположной стороны (В) определяется коэффициент чувствительности защиты А:

$$k'_ч = \frac{I_{рK'}}{I_{с.з.}}, \quad (10-30)$$

где $I_{рK'}$ — минимальный ток в реле, в этих условиях, т. е. при к. з. на границе зоны каскадного действия; рекомендуется иметь $k'_ч \geq 1,5$. Аналогично проверяется $k'_ч$ для защиты В.

б) В случае установки поперечных дифференциальных защит с обеих сторон линии (рис. 10-31, б) определяется $k''_ч$ при повреждении в точке равной чувствительности обеих защит, которая

находится из условия

$$\frac{I_{pA}}{I_{с.зA}} = \frac{I_{pB}}{I_{с.зB}}, \quad (10-31)$$

где I_{pA} и I_{pB} — токи в реле защиты A и B при к. з. в точке K'' .

Если обозначить расстояние от защиты B до точки K'' через l_B , то, приравнявая падение напряжения в параллельных ветвях от подстанции B до точки K'' по контуру линий II и III и учитывая (10-31), получаем:

$$l_B = \frac{I_{с.зA}}{I_{с.зA} + I_{с.зB}} l. \quad (10-32)$$

Определив местоположение точки K'' , рассчитывают токи к. з. и токи в реле защиты A и B , после чего находят:

$$k_q^* = \frac{I_{pA(K)}}{I_{с.зA}} = \frac{I_{pB(K)}}{I_{с.зB}}. \quad (10-33)$$

Рекомендуется иметь $k_q^* \geq 2$.

Мертвая зона по напряжению определяется на основании соображений, изложенных в § 7-7.

10-11. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Защита основана на сравнении величины и направления токов нулевой последовательности, протекающих по

параллельным линиям при к. з. на землю. Схема защиты, показанная на рис. 10-32, состоит из пускового токового реле T_0 и реле направления мощности M_0 двустороннего действия, включенных на разность токов $3I_0$ параллельных линий I и II . $I_p = 3I_{0I} - 3I_{0II}$. Для получения тока $3I_0$ используется нулевой провод трансформаторов тока, соединенных по схеме трехфазной звезды. Обмотка напряжения реле M_0 питается напряжением $3U_0$, которое подводится от разомкнутого треугольника трансформатора напряжения. Угол сдвига между U_0 и I_0 близок к 90° (см. гл. 8), вследствие чего применяется реле мощности синусного или смешанного типа, имеющее максимальную чувствительность при $\varphi_p \approx 90^\circ$.

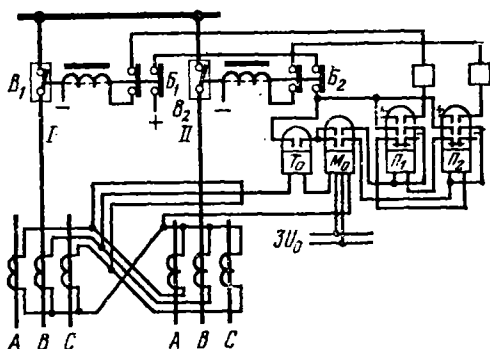


Рис. 10-32. Схема поперечной направленной дифференциальной защиты нулевой последовательности.

Пусковое реле T_0 не должно работать от тока небаланса $I_{нб, макс}^{(3)}$, возникающего в этом случае, так как иначе фазный комплект будет выведен из действия. Поэтому $I_{с.з.н.п} = k_H I_{нб, макс}^{(3)}$.

10-13. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПУСКОВЫХ ОРГАНОВ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Защита, включаемая на разность фазных токов. При больших токах нагрузки и относительно малых токах к. з. пусковые токовые реле защиты оказываются недостаточно чувствительными. Для повышения чувствительности применяется блокировка от реле напряжения (рис. 10-34). В защитах от всех видов к. з. блокировка выполняется тремя реле минимального напряжения H_{AB} , H_{BC} и H_{CA} , включаемыми на линейные напряжения, и реле H_0 , включенным на напряжение нулевой последовательности.

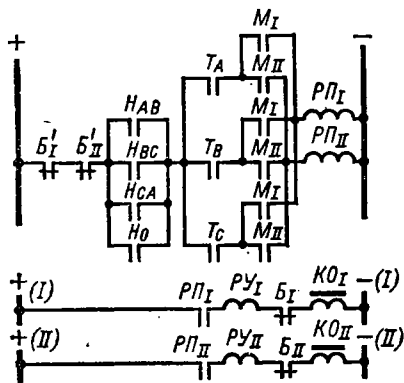


Рис. 10-34. Схема цепей оперативного тока трехфазной направленной поперечной дифференциальной защиты с блокировкой от реле напряжения.

Реле напряжения срабатывают при к. з. и дают плюс к защите, разрешая ей действовать.

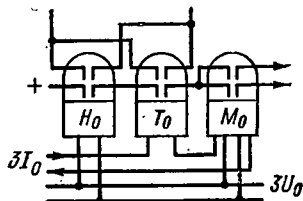


Рис. 10-35. Схема комбинированного пуска от H_0 и T_0 для повышения чувствительности защиты, реагирующей на разность токов I_0 .

Напряжение срабатывания блокирующего реле напряжения H выбирается на основе соотношений, изложенных в § 4-7, по формуле

$$U_{с.р} = \frac{U_{раб. мин}}{k_{воз} k_H n_H}.$$

Ток срабатывания пускового токового реле T не отстраивается от $I_{нб, макс}$ и выбирается лишь по условию отстройки от $I_{нб}$ при внешних к. з. по выражению (10-23).

Защита, включаемая на разность токов I_0 . При больших токах небаланса чувствительность пускового реле может оказаться недостаточной. Для повышения чувствительности токовое пусковое реле T_0 дополняется реле напряжения H_0 , реагирующим на $3U_0$ (рис. 10-35). При к. з. на землю появляются ток I_0 и напряжение U_0 . Оба реле T_0 и H_0 приходят в действие, разрешая защите работать.

При междуфазных к. з. реле H_0 не действует, и поэтому ложного пуска комплекта от однофазных к. з. и блокирования комплекта от междуфазных к. з. не может быть, даже если реле T_0 сработает от $I_{нб}$.

Напряжение срабатывания реле H_0 выбирается больше $U_{нб}$ при нормальном режиме. Обычно $U_{нб} \leq 5$ В. Поэтому $U_{с.р}$ принимается не больше 10 В.

Ток срабатывания T_0 при наличии пускового реле H_0 отстраивается только от тока небаланса при внешних к. з. на землю. Благодаря этому чувствительность пускового органа повышается.

10-14. ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

Положительными особенностями направленной поперечной защиты являются простота схемы, меньшая стоимость по сравнению с продольной дифференциальной защитой, отсутствие выдержки времени, нереагирование на качания, простота выбора параметров защиты.

К недостаткам защиты нужно отнести каскадное действие, вызывающее замедленное отключение к. з. в зоне каскадного действия; мертвую зону по напряжению; необходимость вывода из действия защиты при отключении одной линии, в связи с чем требуется дополнительная полноценная защита для оставшейся линии; дополнительную работу защиты при обрыве провода линии с односторонним заземлением.

10-15. ТОКОВАЯ БАЛАНСНАЯ ЗАЩИТА [Л. 42]

Токковая балансная защита является разновидностью поперечной дифференциальной защиты. Она основана на сравнении величин токов в параллельных линиях с использованием для этой цели специальных балансных реле.

В отличие от направленной дифференциальной защиты она не реагирует на направление токов в параллельных линиях и поэтому не может применяться на приемном конце ВЛ. В Советском Союзе эта защита не получила распространения.

ГЛАВА ОДИННАДЦАТАЯ

ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

11-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ.

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания рассмотренные выше максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения к. з. В этом нетрудно убедиться на примере кольцевой сети с двумя источниками питания, представленной на рис. 11-1.

При к. з. на линии $Л2$ максимальная направленная защита $З$ должна работать быстрее защиты 1 , а при к. з. на линии $Л1$, наоборот, защита 1 должна работать быстрее защиты $З$. Эти противоречивые требования не могут быть выполнены при помощи максимальной направленной защиты. Кроме того, максимальные и направленные защиты часто не удовлетворяют требованию быстроты действия. Токовые отсечки далеко не всегда применимы, а продольные дифференциальные защиты могут устанавливаться только на коротких линиях.

В связи с этим возникла необходимость в применении других принципов, позволяющих получить защиты с необходимым быстродействием, обеспечивающие селективность и чувствительность в электрических сетях любой конфигурации. Одной из таких защит является дистанционная защита.

Выдержка времени дистанционной защиты t зависит от расстояния (дистанции) $l_{p.k}$ (рис. 11-2) между местом установки защиты и точкой к. з., т. е. $t = f(l_{p.k})$, и нарастает плавно или ступенчато с увеличением этого расстояния (рис. 11-3). При таком принципе действия ближайшая к месту повреждения дистанционная защита

всегда имеет меньшую выдержку времени, чем более удаленные защиты, благодаря этому автоматически обеспечивается селективное отключение поврежденного участка.

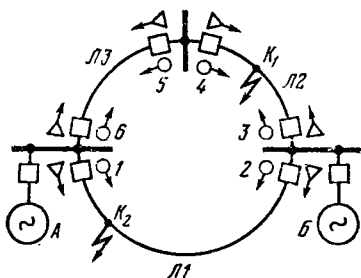


Рис. 11-1. Кольцевая сеть с двумя источниками питания.

○ — максимальная направленная защита; ▽ — дистанционная защита.

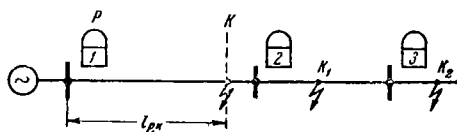


Рис. 11-2. Зависимость выдержки времени дистанционной защиты расстояния $l_{p.k}$ до места к. з.

Например, при к. з. в точке K_1 (см. рис. 11-2) защита 2, расположенная ближе к месту повреждения, работает с меньшей выдержкой времени, чем более удаленная защита 1. Если же к. з. возникнет в точке K_2 , то время действия защиты 2 автоматически увеличится и к. з. будет селективно отключено защитой 3, которая в этом случае срабатывает быстрее остальных защит (2 и 1).

Основным элементом дистанционной защиты является дистанционный орган (называемый также измерительным органом), определяющий удаленность к. з. от места установки защиты.

В качестве дистанционного (измерительного) органа используются реле сопротивления, непосредственно или косвенно реагирующие на полное, активное или реактивное сопротивление линии (z , r , x). Сопротивление фазы линии от места установки реле до места к. з. пропорционально длине этого участка, так как

$$z_{p.k} = z_y l_{p.k}; \quad x_{p.k} = x_y l_{p.k}; \\ r_{p.k} = r_y l_{p.k},$$

где $z_{p.k}$, $x_{p.k}$, $r_{p.k}$ — полное, реактивное и активное сопротивления участка линии длиной $l_{p.k}$; z_y , x_y , r_y — удельное сопротивление на 1 км линии.

Таким образом, поведение реле, реагирующих на сопротивление линии, зависит от удаленности места повреждения $l_{p.k.}$. В зависимости от вида сопротивления, на которое реагирует дистанционный орган (z , x или r), дистанционные защиты подразделяются на защиты полного, реактивного и активного сопротивления. Дистанционные защиты реактивного и особенно активного сопротивлений применяются редко и поэтому в дальнейшем не рассматриваются.

Для обеспечения селективности дистанционные защиты в сетях сложной конфигурации необходимо выполнять направленными, действующими только при направлении мощности к з. от шин в линию (рис. 11-4). Выдержки времени у защит, работающих при одинаковом направлении мощности, взаимно согласовываются так, чтобы при к. з. за пределами защищаемой линии каждая защита имела выдержку времени на ступень больше выдержки времени защит на следующем участке. Направленность действия дистанционных защит осуществляется при помощи обычных реле направления мощности или путем применения направленных измерительных или пусковых органов, способных реагировать на направление мощности к з.

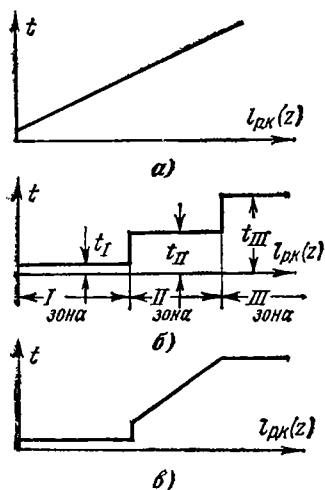


Рис. 11-3. Характеристики дистанционных защит $t = f(l_{p.k.})$.

a — наклонная; $б$ — ступенчатая; $в$ — комбинированная.

11-2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Зависимость времени действия дистанционной защиты от расстояния или сопротивления до места к. з. $t = f(l_{p.k.})$ или $t = f(z)$ называется характеристикой выдержки времени дистанционной защиты. По характеру этой зависимости дистанционные защиты делятся на три группы: с п л а в н о н а р а с т а ю щ и м и (наклонными) характеристиками времени действия, с т у п е н ч а т ы м и и к о м б и н и р о в а н н ы м и характеристиками (рис. 11-3).

Конструктивное выполнение дистанционных защит с наклонной и комбинированной характеристиками значительно сложнее, чем с характеристикой ступенчатого типа; в то же время ступенчатые защиты обеспечивают более быстрое отклонение повреждений, чем защиты с наклонной характеристикой. В результате этого наиболее распространенными являются дистанционные защиты со ступенчатой характеристикой. Они выполняются в большинстве случаев с тремя ступенями времени: t_I , t_{II} , t_{III} , соответствующими тремя зонам действия защиты (рис. 11-3, б). Имеются

защиты и с большим числом ступеней и зон, но увеличение их числа ведет к усложнению защит и не дает существенной пользы.

Принцип обеспечения селективности действия защит со ступенчатой характеристикой иллюстрируется на рис. 11-4.

Протяженность первой зоны берется несколько меньше протяженности линии с учетом погрешности Δz в сопротивлении срабатывания дистанционного реле. В зависимости от точности реле первая зона составляет 0,7—0,85 длины защищаемой линии. При к. з. в пределах первой зоны защита действует мгновенно. Остальная часть линии и шины противоположной подстанции охватываются второй зоной, протяженность и выдержка времени которой согласуются с первой зоной защиты следующего участка. Короткое замыкание в пределах второй зоны защита отключает с выдержкой времени t_2 . Последняя, третья зона защиты является резервной, ее протяженность выбирается из условия охвата следующего участка на случай отказа его защиты или выключателя. При повреждениях в третьей зоне защита действует с выдержкой времени t_3 .

На диаграмме рис. 11-4 пунктиром показаны выдержки времени токовых направленных защит в предположении, что они установлены вместо дистанционных. Сравнение их с характеристиками дистанционных защит показывает, что дистанционный принцип позволяет существенно уменьшить время отключения к. з. на линиях и, что особенно важно, дает возможность отключать к. з. вблизи шин станций и подстанций быстрее, чем удаленные от шин к. з.

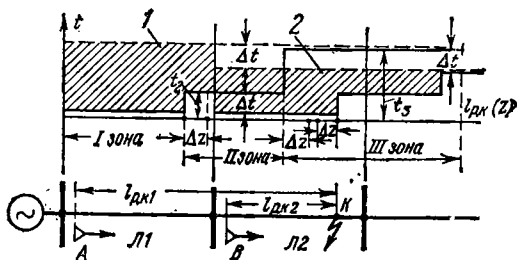


Рис. 11-4. Согласование выдержек времени дистанционных защит со ступенчатой характеристикой.

Δz — погрешность дистанционного реле; Δt — ступень селективности.

11-3. ЭЛЕМЕНТЫ И УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Дистанционная защита относится к числу сложных защит. Все разновидности этой защиты состоят из нескольких общих элементов (органов защиты), выполняющих определенные однотипные функции.

Взаимную связь между органами дистанционной защиты, их назначение и выполняемые ими функции можно пояснить упрощен-

ной схемой защиты со ступенчатой характеристикой, показанной для одной фазы на рис. 11-5.

Защита состоит из следующих органов:

1) пускового органа 1, пускающего защиту при возникновении к. з. Обычно пусковой орган выполняется при помощи реле полного сопротивления или токовых реле. На рис. 11-5 в качестве пускового органа 1 показано реле сопротивления, питаемое током I_p и напряжением U_p сети;

2) дистанционного органа 2, определяющего удаленность места к. з. В ступенчатых защитах — выполняется с помощью реле минимального сопротивления. К реле подводится ток

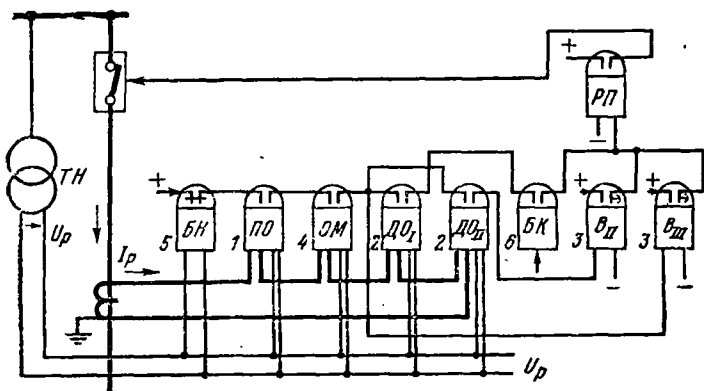


Рис. 11-5. Упрощенная схема трехступенчатой дистанционной защиты.

и напряжение защищаемой линии (I_p и U_p), и оно срабатывает при условии, что

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} < z_{c.p}, \quad (11-1)$$

где $z_{c.p}$ — наибольшее сопротивление, при котором реле начинает действовать, т. е. сопротивление срабатывания реле.

Сопротивление z_p иногда называется ф и к т и в н ы м, так как в некоторых режимах (например, при нагрузке и качаниях) z_p не является сопротивлением линии. В этих случаях оно представляет собой отношение U_p/I_p , обладающее размерностью сопротивления, но не имеющее физического значения;

3) органа выдержки времени 3, создающего выдержку времени, с которой в зависимости от поведения дистанционного органа действует защита; выполняется в виде реле времени обычной конструкции;

4) органа направления мощности 4, не позволяющего работать защите при направлении мощности к. з. к шинам подстанции. Выполняется при помощи реле направления мощности и предусматривается только в тех случаях, когда пусковые и дистанционные органы не обладают направленностью;

5) блокировки, автоматически выводящие защиту из действия в тех режимах, когда защита может сработать неправильно при отсутствии повреждения. Обычно применяются две блокировки:

а) блокировка 5 от исчезновения напряжения U_p при неисправностях в цепях напряжения, питающих защиту; при $U_p = 0$, как следует из (11-1); $z_p = 0$, в этих условиях пусковые реле (если они реагируют на z) и дистанционные органы защиты приходят в действие, что может привести к неправильной работе защиты; блокировка 5 выполняется по схемам, рассмотренным в § 6-4, она приходит в действие при неисправностях в цепях напряжения, снимает оперативный ток с защиты, не позволяя ей действовать на отключение;

б) блокировка 6 от неправильного действия защиты при качаниях в системе; в этом режиме напряжение U_p снижается, а ток I_p возрастает, при этом согласно (11-1) z_p уменьшается, в результате чего пусковые и дистанционные органы защиты могут сработать и вызвать неправильное действие защиты; при возникновении качаний блокировка 6 (см. гл. 12) приходит в действие и выводит защиту из работы, размыкая ее цепь отключения.

Работа схемы. При к. з. на линии работают пусковое реле *ПО* и реле мощности *ОМ*. Через их контакты подается плюс постоянного тока к контактам дистанционных органов и на катушку реле времени третьей зоны. Если к. з. возникло в пределах первой зоны, то дистанционный орган первой зоны $ДО_1$ замыкает контакты, образуя цепь на отключение линии. Если к. з. произошло во второй зоне, $ДО_1$ не работает, так как сопротивление на его зажимах больше уставки сопротивления срабатывания первой зоны ($z_p > z_1$). В этом случае приходит в действие дистанционный орган второй зоны $ДО_{II}$. Он замыкает контакты и пускает реле времени B_{II} . По истечении времени $t_{II}B_{II}$ замыкает контакт и посылает импульс на отключение.

При к. з. за пределами второй зоны дистанционные органы $ДО_1$ и $ДО_{II}$ не работают, так как сопротивления на их зажимах превышают уставки сопротивления срабатывания. Защита не может действовать со временем первой и второй зон. Реле времени B_{III} , запущенное пусковым реле, срабатывает, когда истечет его выдержка времени t_{III} , и посылает импульс на отключение выключателя. Специальных измерительных органов третьей зоны для упрощения защиты обычно не ставят.

11-4. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ РЕЛЕ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЕ НА КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ

а) Характеристика срабатывания

Первоначально дистанционная защита выполнялась с помощью реле сопротивления, реагирующих только на абсолютную величину сопротивления z_k до точки к. з. Но по мере увеличения

протяженности линий электропередачи и роста передаваемой по ним нагрузки абсолютные значения сопротивлений при к. з. $z_k = U_k/I_k$ в конце линий стали соизмеримыми с сопротивлениями z_n при аварийной нагрузке на линиях электропередачи. В таких условиях реле сопротивления, реагирующие на абсолютные значения z , не могут точно различать к. з. от нагрузки. В связи с этим дистанционные защиты стали выполняться реагирующими не только на величину z_p , но и на угол $\varphi_p = \arctg \frac{x}{r}$, так как при к. з. и при передаче больших потоков активной мощности углы сопротивлений z_k и z_n различаются: при к. з. $\varphi_p \approx 80^\circ$, а при нагрузке $\varphi_p \approx 15 \div 30^\circ$. Для этой цели были разработаны реле сопротивления, у которых $z_{c.p} = f(z_p, \varphi_p)$. Такая зависимость называется характеристикой срабатывания реле. Предложены и получили распространение реле с различными характеристиками, рассматриваемыми ниже.

6) Использование комплексной плоскости для изображения характеристик реле

Х а р а к т е р и с т и к о й с р а б а т ы в а н и я называется зависимость $z_{c.p} = f(\varphi_p)$, которая определяет значения векторов z_p на зажимах реле при его срабатывании.

Сопротивление z является комплексной величиной, поэтому характеристики срабатывания реле и сопротивления на их зажимах удобно изображать на комплексной плоскости, в о с я х r, x (рис. 11-6). В этом случае по оси вещественных величин комплексной плоскости откладываются активные сопротивления r , а по оси мнимых величин j располагаются реактивные сопротивления x . Любое полное сопротивление на зажимах реле $z_p = U_p/I_p$ может быть выражено через активные и реактивные составляющие в виде комплексного числа $z_p = r_p + jx_p$ и изображено в осях r, x вектором с координатами r_p и x_p (рис. 11-6, а). Величина этого вектора характеризуется модулем $|z_p| = \sqrt{r_p^2 + x_p^2}$, а его направление — углом φ_p , который определяется соотношением x_p и r_p , поскольку $\tg \varphi_p = x_p/r_p$. Из рис. 11-6, б видно, что угол φ_p равен углу сдвига фаз между векторами тока I_p и напряжения U_p и, следовательно, можно считать, что на комплексной плоскости вектор I_p совпадает с осью положительных сопротивлений r , а напряжение U_p — с вектором z_p . В дальнейшем ось мнимых величин обозначается буквой x .

Л ю б о й у ч а с т о к с е т и, например линию ЛЛ, показанную на рис. 11-6, в, можно также представить в осях r, x вектором $z_{AB} = z_\Delta$, имея в виду, что каждая точка линии характеризуется определенными сопротивлениями r_Δ и x_Δ .

Если сопротивления всех участков сети имеют один и тот же угол $\varphi_\Delta = \arctg \frac{x_\Delta}{r_\Delta}$, то их геометрическое место на комплексной

плоскости изобразится в виде прямой, смещенной относительно оси r на угол φ_d (рис. 11-6, $г$).

Начало защищаемой линии, где установлена рассматриваемая защита A , совмещается с началом координат (рис. 11-6, $в$ и $г$). Координаты всех участков сети, попадающих в зону защиты A , считаются положительными и располагаются в I квадранте плоскости (рис. 11-6, $в$). Координаты участков сети, расположенных влево от точки A , считаются отрицательными и располагаются

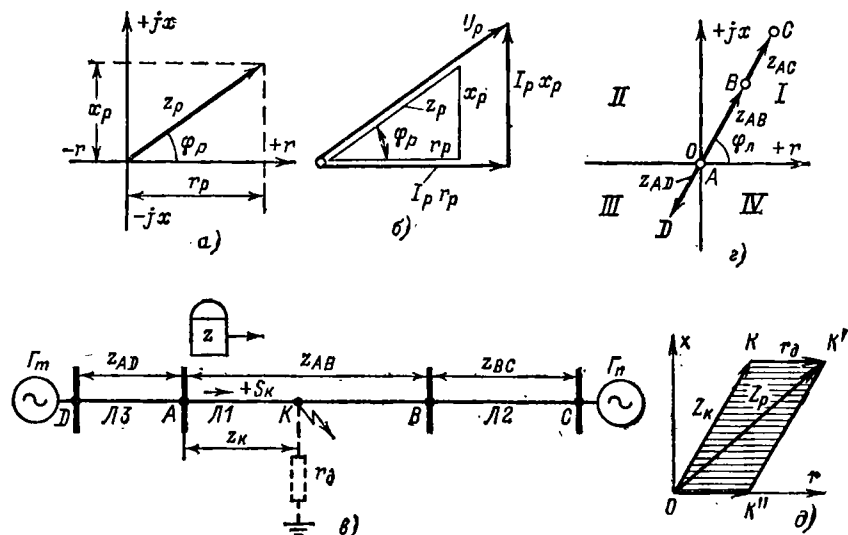


Рис. 11-6. Комплексная плоскость r, jx .

$а$ — изображение вектора z_p ; $б$ — треугольник сопротивлений; $в$ и $г$ — участок сети и его изображения в осях r, jx ; $д$ — область сопротивлений z_p при к. з. через сопротивление r_d электрической дуги в осях r, jx .

в III квадранте. Сопротивление линии $Л1$ показано на диаграмме отрезком AB , линии $Л2$ — отрезком BC и линии $Л3$ — отрезком AD ,

Сопротивление z_K от места установки защиты A до точки к. з. K изобразится отрезком $\overline{AK}$ под углом $\varphi_K = \varphi_d$ к оси r (рис. 11-6, $в$ и $д$). Если к. з. произошло через электрическую дугу, имеющую, как показали исследования, активное сопротивление r_d , то сопротивление до места к. з. будет изображаться вектором $\overline{AK'}$, равным геометрической сумме векторов z_K и r_d^* :

$$\overline{AK'} = z_K + r_d. \quad (11-1a)$$

* Выражение (11-1a) справедливо для условий одностороннего питания места к. з. (от генератора Γ_m). При двустороннем питании за счет сдвига фаз между токами к. з. от генератора Γ_m и Γ_n вектор $\overline{KK'}$ будет расположен под углом к оси r . В этом случае $z_p = z_K + k r_d$, где k — комплексная величина, зависящая от соотношения и фаз токов, притекающих к точке к. з.

Исследования показали, что r_d зависит от протяженности дуги l_K и величины тока к. з. I_K в электрической дуге:

$$r_d = k \frac{l_K}{I_K}. \quad (11-16)$$

С учетом этого сопротивление r_d при к. з. в начале линии будет меньше, чем в конце, поскольку ток к. з. I_K в первом случае всегда больше, чем во втором.

в) Характеристики срабатывания реле

Х а р а к т е р и с т и к и с р а б а т ы в а н и я основных типов реле минимального сопротивления изображены на рис. 11-7. Характеристики каждого реле представляют собой геометрическое

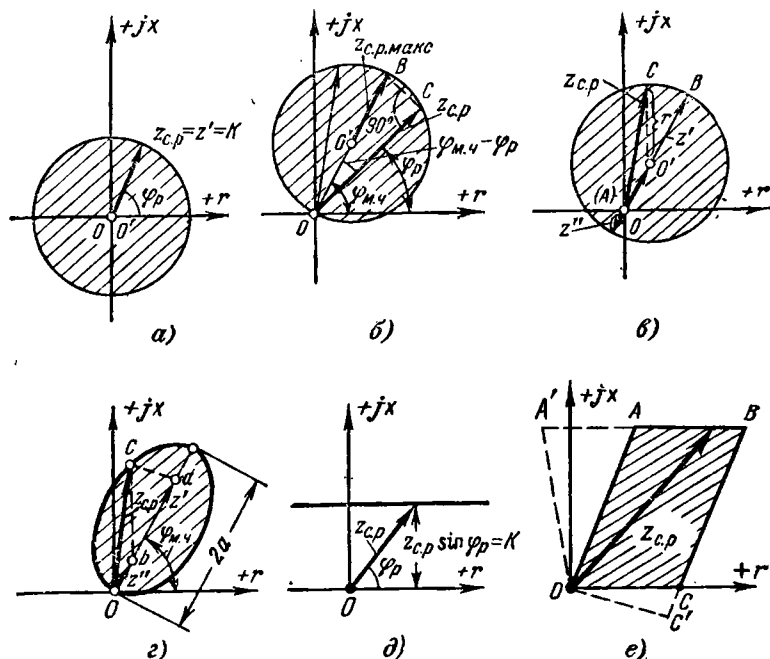


Рис. 11-7. Характеристики срабатывания реле сопротивления.

место точек, удовлетворяющих условию $z_p = z_{c.p.}$. Заштрихованная часть характеристики, где $z_p < z_{c.p.}$, соответствует области действия реле. При z_p , выходящих за пределы заштрихованной части, т. е. при $z_p > z_{c.p.}$, реле не работает. Таким образом, характеристика работы реле является пограничной кривой, определяющей условия действия реле. Эту характеристику можно рассматривать как зависимость величины (модуля) вектора сопротивления сраба-

тивания реле $z_{с.р}$ от угла φ_p , определяющего его направление, и представлять в виде уравнения $z_{с.р} = f(\varphi_p)$.

Характеристика срабатывания реле должна обеспечивать работу реле при к. з. в пределах принятой зоны действия (z'). С учетом сопротивления электрической дуги вектор $z_p = z_k + r_d$ может располагаться при к. з. на защищаемом участке линии в пределах площади четырехугольника $ОКК'K''$, показанного на рис. 11-6, д. Действие реле при к. з. будет обеспечено, если характеристики срабатывания реле, показанные на рис. 11-7, будут охватывать область комплексной плоскости, в которой может находиться вектор сопротивления z_p при к. з. на линии (площадь $ОКК'K''$ на рис. 11-6, д).

На рис. 11-7 приводятся наиболее распространенные характеристики реле, изображаемые в осях x, y в виде окружности, эллипса, прямой линии, многоугольника.

Ненаправленное реле полного сопротивления (рис. 11-7, а). Уравнение срабатывания реле

$$z_{с.р} = K, \quad (11-2)$$

где K — постоянная величина.

Характеристика этого реле имеет вид окружности с центром в начале координат и радиусом, равным K . Реле работает при $z_p \leq K$, при любых углах φ_p между вектором z_p и осью r . Зона действия реле расположена в четырех квадрантах, в том числе в первом и третьем. Последнее означает, что реле с характеристикой (11-2) работает как **ненаправленное** реле сопротивления.

Направленное реле полного сопротивления имеет $z_{с.р}'$, зависящее от угла φ_p (рис. 11-7, б). Его характеристика срабатывания изображается окружностью, проходящей через начало координат. Сопротивление срабатывания имеет максимальное значение при

$$\varphi_p = \varphi_{м.ч},$$

где $\varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности реле, при котором $z_{с.р} = z_{с.р.макс}$, т. е. равен диаметру окружности $ОВ$.

Зависимость срабатывания этого реле от угла φ_p может быть представлена уравнением

$$z_{с.р} = z_{с.р.макс} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_p). \quad (11-3)$$

Оно легко получается из рассмотрения треугольника $ОВС$ на рис. 11-7, б. Реле не работает при z_p , расположенных в третьем квадранте. Это означает, что оно не может действовать, если мощность направлена к шинам подстанции. Следовательно, рассмотренное реле является **направленным**.

Реле со смещенной круговой характеристикой (рис. 11-7, в). Характеристика реле смещена относительно оси координат в третий квадрант на величину z'' . Поэтому реле не только работает на защищаемой линии, но и захватывает шины A , питающие линию,

и часть длины отходящих от них присоединений. Уравнение смещенной характеристики имеет вид:

$$\left| \frac{z' - z''}{2} \right| - \left| z_{c.p} - \frac{z' + z''}{2} \right| = 0. \quad (11-4)$$

Уравнение (11-4) можно получить из рассмотрения треугольника $OO'C$. Как видно из чертежа, геометрическая разность вектора $z' - z''$ равна диаметру окружности, отсюда

$$\left| \frac{z' - z''}{2} \right| = r. \quad (11-4a)$$

Из того же чертежа видно, что $\frac{z' + z''}{2} = \overline{OO'}$, с учетом этого

$$\left| z_{c.p} - \frac{z' + z''}{2} \right| = |\overline{OC} - \overline{OO'}| = \overline{O'C} = r, \quad (11-4b)$$

где C — любая точка окружности; r — радиус окружности.

Приравнивая левые части уравнений (11-4a) и (11-4b), получаем (11-4).

Реле с эллиптической характеристикой. На рис. 11-7, а изображена характеристика направленного реле, имеющая вид эллипса. Сопротивление срабатывания $z_{c.p}$ такого реле зависит от угла φ_p и имеет наибольшее значение при $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$. Угол $\varphi_{м.ч}$ обычно принимается равным $\varphi_{л}$. Сопротивление $z_{c.p, макс}$ равно большей оси эллипса $2a$.

Как известно, эллипс является геометрическим местом точек, сумма расстояний которых до фокусов b и d постоянна и равна большей оси $2a$. На основании этого, обозначая координаты фокусов b и d , z'' и z' , а координаты любой точки C эллипса $z_{c.p}$, получаем уравнение эллиптической характеристики

$$|z_{c.p} - z'| + |z_{c.p} - z''| = 2a. \quad (11-5)$$

Зона действия реле заштрихована. По сравнению с круговой характеристикой эллиптическая характеристика имеет меньшую рабочую область. Это дает возможность лучше отстроить реле от качаний и перегрузок.

Реле реактивного сопротивления срабатывает при

$$x_p = z_{c.p} \sin \varphi_p = x_{c.p} = K,$$

где $x_{c.p}$ — постоянная величина, не зависящая от φ_p .

Характеристика таких реле изображается прямой линией, параллельной оси r (рис. 11-7, б), отстоящей от нее на расстоянии $x_{c.p} = K$.

Реле с характеристикой в виде многоугольника. Подобная характеристика направленных реле сопротивлений показана на рис. 11-7, в. Сопоставляя эту характеристику с площадью $OKK'K''$ на рис. 11-6, б, можно установить, что четырехугольная характеристика реле в большей мере, чем другие характеристики, совпа-

дает с контуром области расположения векторов $\mathbf{z}_p$ при к. з. и является, с этой точки зрения, наиболее рациональной.

Реле с характеристикой в виде многоугольника сложнее в конструктивном отношении и имеют пока ограниченное применение.

Пунктиром показан вариант характеристики подобных же реле в виде многоугольника $OA'BC'$. Такое расширение зоны реле предусматривается для обеспечения его действия при двустороннем питании к. з. через переходное сопротивление r_d .

11-5. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКЦИЯМ

Дистанционные реле могут выполняться на различных принципах (см. § 2-4). До последнего времени значительное распространение имеют электромеханические конструкции на электромагнитном и особенно индукционном принципе. За последние годы разработаны и внедряются реле с использованием полупроводниковых приборов. Реле сопротивления на полупроводниках обладают существенными преимуществами, отмеченными в § 2-14, и постепенно вытесняют электромеханические конструкции. Отечественная промышленность переходит на выпуск реле сопротивлений только на выпрямленном токе с полупроводниковыми приборами.

Принцип действия всех разновидностей реле сопротивления основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, являющихся функциями тока и напряжения сети $\dot{I}_p$ и $\dot{U}_p$ по выражениям (2-38). В общем случае

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I &= k_1 \dot{U}_p + k_2 \dot{I}_p; \\ \dot{U}_{II} &= k_3 \dot{U}_p + k_4 \dot{I}_p. \end{aligned} \right\} \quad (11-6)$$

В электромеханических конструкциях сравнение $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ осуществляется тремя способами: механическим — путем сравнения электромагнитных моментов $M_{эI}$ и $M_{эII}$, пропорциональных соответственно U_I^2 и U_{II}^2 ; электрическим — непосредственным сравнением $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ и магнитным — путем сопоставления магнитного потока $\Phi_I \equiv U_I$ с потоком $\Phi_{II} \equiv U_{II}$.

В реле на полупроводниках напряжения U_I и U_{II} сравниваются с помощью схем сравнения, рассмотренных в § 2-16.

Меняя коэффициенты k в выражениях (11-6), можно получать реле сопротивления с различными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, а — г.

Для получения реле с более сложными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, г, е и другими разновидностями используется сравнение трех и более электрических величин, также являющихся линейными функциями I_p и U_p .

Основные требования к параметрам реле сопротивления сводятся к следующему:

1. Реле сопротивления должны быть быстродействующими, чтобы обеспечить быстрое отключение к. з. в пределах первой зоны. Для этого в сетях 110—500 кВ необходимо иметь время действия реле $t_p = 0,02 \div 0,05$ с.

2. Реле сопротивления, выполняющие функции дистанционных органов, должны отличаться точностью $z_{c.p}$ с тем, чтобы зоны действия защит были стабильными. Погрешность в отклонении величины $z_{c.p}$ от заданной установки z_y не должна превышать 10%.

3. Пусковые реле сопротивления должны иметь высокий коэффициент возврата:

$$k_b = \frac{z_b}{z_{c.p}} = 1,05 \div 1,15.$$

11-6. РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

а) Общие принципы выполнения реле

Реле сопротивления на выпрямленном токе отличаются простотой схемы, малым потреблением мощности и позволяют получать характеристики срабатывания различного вида (окружность, эллипс и др.).

Принцип действия этих реле основан на сравнении абсолютных величин двух напряжений U_I и U_{II} , являющихся в общем случае функцией напряжения и тока сети (U_p и I_p) согласно (11-6). Для получения реле сопротивления в уравнениях (11-6), определяющих значение U_I и U_{II} , необходимо принять коэффициент $k_3 = 0$, $k_2 < 0$, а k_1 и $k_4 > 0$. Тогда подлежащие сравнению напряжения будут связаны с U_p и I_p следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I &= k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p; \\ \dot{U}_{II} &= k_4 \dot{I}_p. \end{aligned} \right\} \quad (11-7)$$

Сравнение указанных величин U_I и U_{II} производится так же, как и в схемах реле мощности, — непосредственным вычитанием одной величины из другой. Для устранения влияния сдвига фаз сравниваемые напряжения выпрямляются, а затем выпрямленные величины $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$, пропорциональные средним значениям U_I и U_{II} , вычитаются друг из друга по схемам, рассмотренным в § 2-11.

Типовая блок-схема реле сопротивления на сравнении абсолютных значений двух напряжений приведена на рис. 11-8.

Реле состоит из преобразующих (суммирующих) устройств 1 и 2, выпрямителей на полупроводниковых диодах 3 и 4, схемы

сравнения 5 и реагирующего исполнительного органа (нуль-индикатора) 6.

К входным зажимам реле подводятся напряжение и ток сети U_p и I_p . В суммирующих устройствах 1 и 2 напряжение U_p преобразуется с помощью трансформатора в напряжение $k_1 \dot{U}_p$, а ток I_p посредством трансреактора превращается в два напряжения $k_2 \dot{I}_p$ и $k_4 \dot{I}_p$. Преобразованные величины суммируются согласно (11-7), в результате чего на выходе сумматора образуются два напряжения:

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p.$$

Каждое из них выпрямляется с помощью выпрямителей 3 и 4, и полученные абсолютные значения $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ на выходе выпрямителей (или пропорциональные им токи $|I_I|$ и $|I_{II}|$) подводятся к схеме сравнения 5, где вычитаются друг из друга. На выходе схемы сравнения образуется напряжение $U_{\text{вых}} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|$ или ток $I_{\text{вых}} = |I_{II}| - |I_I|$, которые подводят к исполнительному (реагирующему) органу 6, обладающему направленностью, т. е. действующему только при определенном (положительном) знаке подведенного к нему напряжения или тока.

Полярность включения исполнительного органа подбирается с таким расчетом, чтобы он работал при $U_{II} > U_I$ и не действовал, если $U_{II} < U_I$. Напряжение U_{II} называется р а б о ч и м, а U_I — т о р м о з н ы м, так как под влиянием U_{II} исполнительный орган приходит в действие, а от U_I — не работает. При выбранной функциональной связи сравниваемых напряжений с U_p и I_p по выражениям (11-7) относительное значение величин U_I и U_{II} , а следовательно, и поведение реле зависят от соотношения U_p и I_p или, иначе говоря, от $Z_p = U_p/I_p$.

В н о р м а л ь н о м р е ж и м е напряжение U_p близко к номинальному, а ток I_p относительно невелик, поэтому $U_I = |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|$ превосходит $U_{II} = |k_4 \dot{I}_p|$ и реле не работает. П р и к. з. в з о н е действия защиты ток I_p возрастает, а напряжение U_p снижается, в результате этого U_{II} становится больше U_I и реле приходит в действие.

Исполнительный орган может выполняться в трех вариантах, рассмотренных в § 2-16:

1) с помощью поляризованного или магнитоэлектрического реле, непосредственно подключенного к зажимам m и n ;

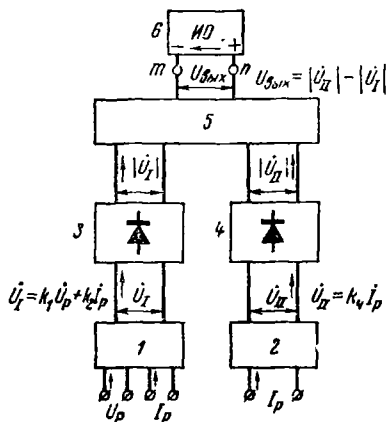


Рис. 11-8. Блок-схема сопротивления на выпрямленном токе.

2) с помощью тех же реле, включаемых через усилитель на полупроводниках (рис. 2-49, § 2-16), работающий в качестве нуль-индикатора, т. е. реагирующий на знак сигнала;

3) с помощью триггера (бесконтактного реле) на полупроводниках, на выходе которого появляется напряжение в зависимости от знака сигнала.

Общие положения о выполнении исполнительного органа и остальных элементов блок-схемы были рассмотрены в § 2-16.

Если принять в (11-7) $k_2 = 0$, то $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$ и $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$; в этом случае реле имеет характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат. Приняв в (11-7) $k_2 = k_4$ получим реле с характеристикой в виде окружности, проходящей через начало координат. При $k_2 \neq k_4$ характеристика имеет вид окружности, смещенной относительно начала координат.

Таким образом, различные виды реле с помощью простого изменения рассмотренной конструкции можно получить, изменяя зависимости сравниваемых напряжений U_I и U_{II} от U_p и I_p без принципиальных изменений схемы реле.

Рассмотрим в качестве примера конкретные схемы направленного и ненаправленного реле сопротивления.

б) Ненаправленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Устройство и принцип действия реле. Два варианта реле со схемой сравнения на балансе токов и на балансе напряжений в упрощенном виде показаны на рис. 11-9.

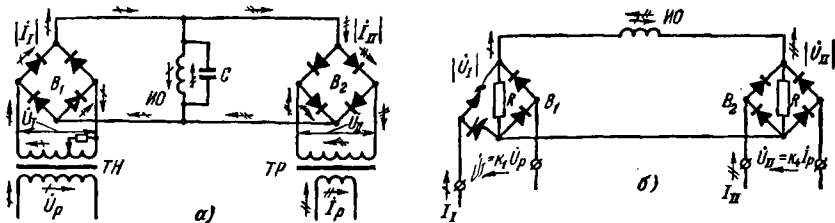


Рис. 11-9. Ненаправленное реле сопротивления, выполненное с помощью схем сравнения.

а — на балансе токов; б — на балансе напряжений.

Чтобы получить характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат, к схеме сравнения реле подводятся два напряжения:

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p. \quad (11-8)$$

Эти напряжения получают путем преобразования U_p и I_p , которые, как показано на рис. 11-9, а, подаются на входные зажимы реле.

С помощью вспомогательного трансформатора напряжения $TН$ U_p превращается в $U_I = k_1 \dot{U}_p$, а ток I_p с помощью трансреактора $ТР$ преобразуется в напряжение $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$. Полученные таким образом напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ подводятся к выпрямителям B_1 и B_2 , выполненным по двухполупериодной схеме на полупроводниковых диодах.

Под действием напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ возникают пропорциональные им токи $\dot{I}_I = k' \dot{U}_p$ и $\dot{I}_{II} = k'' \dot{I}_p$, которые выпрямляются выпрямителями и замыкаются через реагирующее реле (орган) $ИО$. Токораспределение токов I_I и I_{II} показано на рис. 11-9, а и б. В схеме сравнения на балансе токов реле $ИО$ (рис. 11-9, а) включается параллельно выпрямителям на разность выпрямленных токов. В этом случае ток в $ИО$ $\dot{I}_p = |\dot{I}_{II}| - |\dot{I}_I|$.

Как уже отмечалось, реагирующий орган выполняется с помощью направленного реле постоянного тока. Он работает, если $|\dot{I}_{II}| > |\dot{I}_I|$, и не действует, если $|\dot{I}_{II}| < |\dot{I}_I|$.

Аналогично этому в схеме сравнения на балансе напряжений (рис. 11-9, б) реле $ИО$ работает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$; и не действует, если $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

Условием начала действия реле является равенство $|\dot{I}_{II}| = |\dot{I}_I|$ или $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$; первое для схемы на балансе токов, второе — на балансе напряжений.

Выражая токи и напряжения через U_p и I_p с учетом (11-28), получаем уравнения начала срабатывания для обоих реле:

$$|k_4 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p|. \quad (11-9)$$

Разделив обе части равенства на $k_1 I_p$, найдем z_p , при котором реле начнет действовать:

$$z_p = z_{c.p} = \frac{|\dot{U}_p|}{|\dot{I}_p|} = \frac{k_4}{k_1} = |z'| = \text{const}. \quad (11-10)$$

Выражение (11-10) показывает, что реле будет работать при сопротивлении $z_p \leq z_{c.p}$; величина $z'_{c.p}$ определяется отношением k_4/k_1 , которое можно рассматривать как абсолютное значение сопротивления зоны $|z'|$. Это означает, что реле работает при любом z_p , модуль которого равен $|z'|$, независимо от его угла и знака.

Таким образом, рассмотренное реле действительно является ненаправленным реле сопротивления, имеющим характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат и радиусом, равным $|z'| = k_4/k_1$ (см. рис. 11-7, а).

Сопротивление срабатывания $z_{c.p}$ регулируется изменением k_4 и k_1 , т. е. изменением коэффициентов трансформации $TН$ и $ТР$.

Зависимость $z_{c.p}$ от тока I_p . Условия срабатывания (11-9) являются идеальными, они не учитывают конечной чувствительности исполнительного органа (нуль-индикатора) $ИО$.

В действительности для срабатывания реле необходимо приложить определенное избыточное напряжение U_0 для преодоления механических сил сопротивления подвижной системы исполнительного органа или создания напряжения, необходимого для начала работы бесконтактной релейной схемы на транзисторах (триггера).

С учетом этого для срабатывания реле необходимо выполнить условие

$$|k_4 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p| + |\dot{U}_0|. \quad (11-11)$$

Разделив все члены равенства на $|k_1 \dot{I}_p|$ и сделав преобразования, получим:

$$z_{c.p} = \frac{k_4}{k_1} - \frac{|\dot{U}_0|}{|k_1 \dot{I}_p|}. \quad (11-12)$$

Из (11-12) следует, что $z_{c.p}$ зависит от I_p , во-первых, из-за конечной чувствительности реагирующего реле, характеризуемой напряжением U_0 , и, во-вторых, из-за нелинейности сопротивления выпрямителей в магнитопроводе трансреакторов, в результате которой коэффициенты k_1 и k_4 не остаются постоянными, а меняются с изменением тока I_p .

Зависимость $z_{c.p}$ от I_p является недостатком конструкции, она вызывает непостоянство зоны действия реле (см. § 11-11), т. е. погрешность в $z_{c.p}$.

Сглаживание пульсации выпрямленного тока. Для сглаживания кривой выпрямленных токов в схеме должны быть предусмотрены сглаживающие устройства, рассмотренные в § 2-15. В данной схеме для сглаживания тока предусмотрен конденсатор C . Как указывалось, сглаживающие устройства приводят к некоторому замедлению действия реле.

Реле подобного типа со схемой сравнения на балансе токов и магнитоэлектрическим реле в качестве реагирующего органа применяется в дистанционной защите ДЗ-1 для сети 35 кВ, разработанной лабораторией Энергосетьпроект с участием ЧЭТНИИ и выпускаемой ЧЭАЗ.

в) Направленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Направленное реле сопротивления показано на рис. 11-10, а. Реле основано на сравнении абсолютных значений двух напряжений

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p. \quad (11-13)$$

Здесь $k_4 = k_2$.

Сравниваемые напряжения U_I и U_{II} получаются с помощью вспомогательного трансформатора напряжения TN_1 и двух одинаковых трансреакторов TP_1 и TP_2 . Вторичные обмотки трансреакторов замкнуты на активное сопротивление r .

Напряжение сети U_p подводится к TH_1 и трансформируется на вторичную сторону, образуя напряжение $k_1 U_p$, где k_1 является коэффициентом трансформации TH_1 .

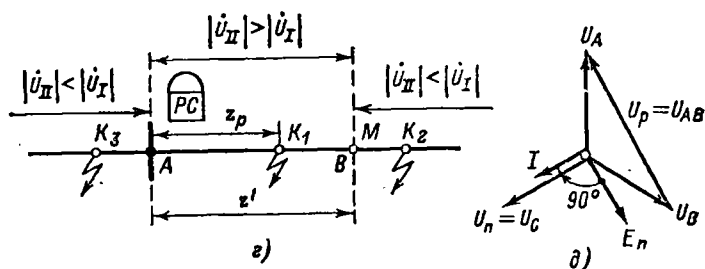
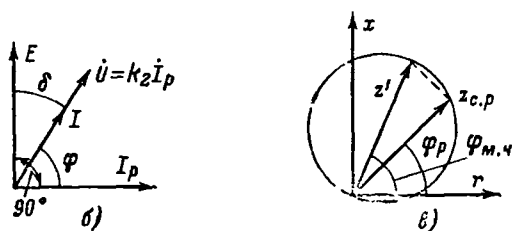
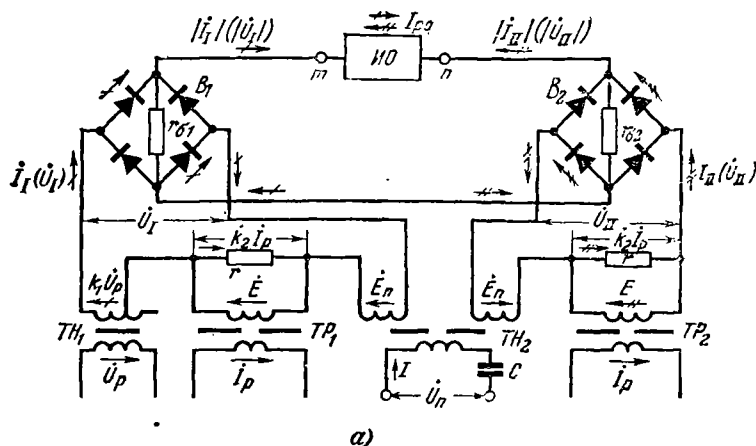


Рис. 11-10. Направленное реле сопротивления со схемой сравнения на балансе напряжений.

а — схема реле; б — векторная диаграмма трансреактора; в — характеристика реле, $\Phi_{м.ч}$ — угол между z' и осью r ; г — схема, понижающая работу реле; д — векторная диаграмма TH_1 .

Ток сети I_p питает первичные цепи трансреакторов TP_1 и TP_2 и наводит во вторичной обмотке каждого из них э. д. с. $\dot{E} = jk\dot{I}_p$, пропорциональную току I_p и сдвинутую от него на 90°

(рис. 11-10, б). Под действием э. д. с. в контуре вторичной обмотки возникает ток $I \equiv E \equiv I_p$, отстающий от E на угол δ , определяемый соотношением x и r контура. Напряжение на вторичных зажимах трансреактора $U = Ir$, с учетом того, что $I \equiv I_p$, $\dot{U} = k_2 \dot{I}_p$. Здесь k_2 — комплексная величина, имеющая размерность сопротивления и зависящая от параметров трансреактора.

Вторичные обмотки TH_1 и TP_1 соединяются между собой встречно (рис. 11-10, а), так чтобы на выходных зажимах образовалось напряжение $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p$. Напряжение $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$ получается с зажимов вторичной обмотки TP_2 . Напряжение U_I подводится к двухполупериодному выпрямителю B_1 , а U_{II} — к выпрямителю B_2 .

Выпрямленные напряжения сопоставляются по величине с помощью схемы сравнения на балансе токов или балансе напряжения. На рис. 11-10, а показана схема на балансе напряжения.

В качестве реагирующего исполнительного органа (нуль-индикатора) $ИО$ используются высокочувствительные магнитоэлектрические реле или нуль-индикатор на полупроводниках с поляризованным реле на выходе. Сглаживание кривой выпрямленных напряжений и токов осуществляется конденсатором или фильтром, запирающим путь переменной составляющей в обмотку реле $ИО$.

Как видно из схемы, напряжение $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ и создаваемые ими токи $|\dot{I}_I|$ и $|\dot{I}_{II}|$ направлены в контуре реле PO навстречу друг другу. Поэтому напряжение на зажимах mn нуль-индикатора

$$\dot{U}_{но} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I| = |k_2 \dot{I}_p| - |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|.$$

Реле срабатывает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$. Условия начала работы реле характеризуются уравнением $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$ или

$$|k_2 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|. \quad (11-14)$$

Условия работы подобного реле на балансе токов аналогичны и выражаются таким же уравнением, так как $I_I \equiv U_I$, а $I_{II} \equiv U_{II}$. Разделив все члены выражения (11-14) на k_1 и I_p , приняв, что $k_2/k_1 = z'/2$, и учтя, что $z_p = U_p/I_p$, соответствующее условию срабатывания (11-14), является $z_{с.р}$, получим:

$$\left| \frac{z'}{2} \right| - \left| z_{с.р} - \frac{z'}{2} \right| = 0. \quad (11-15)$$

Уравнение (11-15) является уравнением окружности, проходящей через начало координат, с диаметром z' (см. рис. 11-10, в). В этом можно убедиться, сопоставив уравнение (11-15) с (11-4), приняв в последнем $z'' = 0$.

Следовательно, рассмотренное реле является **направленным реле сопротивления**.

Как уже отмечалось, у реле с такой характеристикой $z_{с.р}$ зависит от значения угла φ_p .

При $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$, где $\varphi_{м.ч}$ — угол сопротивления z' , $z_{с.р} = z'$ и имеет максимальное значение. При всех других значениях φ_p $z_{с.р} < z'$ и определяется из выражения $z_{с.р} = z' \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p)$. Последнее вытекает из рис. 11-10, в. Поскольку

$$z' = 2 \frac{k_2}{k_1}, \quad (11-16)$$

то величина z' и $z_{с.р}$ может регулироваться изменением k_1 и k_2 , т. е. коэффициентами трансформации (числом витков) TH_1 и TP . Угол $\varphi_{м.ч}$ определяется параметрами трансреактора TP_1 и TP_2 и может регулироваться изменением сопротивления r . Обычно $\varphi_{м.ч}$ принимается равным углу сопротивления защищаемой линии и колеблется в пределах от 60 до 80° .

Выше аналитическим методом было показано, что рассмотренное реле является направленным реле сопротивления. То же самое можно показать, исходя из физической картины зависимости величин I_I и I_{II} (или U_I и U_{II}) от местоположения точки к. з. (рис. 11-40, а).

Действительно, реле работает при $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$ или с учетом того, что $|\dot{U}_{II}| = \left| \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$, а $|\dot{U}_I| = \left| \dot{I}_p z_p - \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$, получим: $\left| \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right| > \left| \dot{I}_p z_p - \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$; сократив обе части на I_p , находим условие работы $\left| \frac{z'}{2} \right| > \left| z_p - \frac{z'}{2} \right|$, где z_p — сопротивление до точки к. з. Рассмотрим самый простой случай, когда $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$ (при этом векторы z_p и z' совпадают по фазе); прибавим к обоим частям неравенства $\left| \frac{z'}{2} \right|$, тогда условие срабатывания преобразуется в выражение $z_p \leq z'$.

При к. з. на участке AB (точка K_1) $z_p < z'$, поэтому реле будет работать, так как при этом $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

При к. з. за точкой B (в точке K_2) $z_p > z'$, значит, реле не действует, поскольку при этом $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

При к. з. до точки A (в точке K_3) z_p отрицательно, в этом случае реле опять не действует, так как $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

Приведенный анализ показывает, что соотношение $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ при выбранной функциональной связи по выражению (11-13) зависит от местоположения к. з.

Устранение мертвой зоны. Для устранения мертвой зоны в рабочий и тормозной контуры реле вводится одинаковая э. д. с. «п а м я т и» $E_{п}$, создаваемая трансформатором TH_2 . Первичная обмотка TH_2 питается напряжением сети $U_{п}$ и с помощью емкости C настроена в резонанс при $f = 50$ Гц. Схема включения TH_2 на напряжение сети выбрана так, что $E_{п}$ примерно совпадает по фазе с U_p , это видно из векторной диаграммы на рис. 11-10, б.

Для этого на вход TH_2 подается напряжение фазы, не подводимой к TH_1 . Например, если $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$, то $\dot{U}_{п} = \dot{U}_C$.

Тогда при близких двухфазных к. з., вызывающих снижения U_p до нуля, напряжение третьей не поврежденной фазы,

подведенное к TN_2 , сохраняется и обеспечивает работу реле за счет напряжения, обусловленного э. д. с. E_n .

При трехфазных к. з. все напряжения падают до нуля. В этом случае э. д. с. E_n поддерживается некоторое время за счет разряда конденсатора C .

В течение времени разряда конденсатора э. д. с. «памяти» создает ток в обоих контурах, обеспечивая работу реле. Чтобы свести к минимуму искажающее влияние E_n на $z_{с.р.}$, величина этой э. д. с. берется не больше 3—5% нормального значения U_p .

По рассмотренной схеме на балансе напряжений с магнитоэлектрическим реле на выходе завод ЧЭАЗ выпускает реле сопротивления типа КРС-1 [Л. 96].

Для упрощения анализа условие срабатывания (11-14) составлено без учета конечной чувствительности исполнительного органа ИО. С учетом этого условие срабатывания реле примет вид $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I| + |\dot{U}_0|$, где U_0 — наименьшее напряжение, которое нужно подать в рабочую цепь (выпрямитель B_2) для приведения в действие реле, при условии, что $U_1 = 0$.

Как и в предыдущем случае, напряжение U_0 создает некоторую зависимость $z_{с.р.}$ от тока I_p (см. § 11-6, б).

г) Направленное реле сопротивления с эллиптической (овальной) характеристикой

Реле, построенное на сравнении величин трех напряжений. Общий принцип выполнения реле представлен на рис. 11-11. К реле подводятся три напряжения:

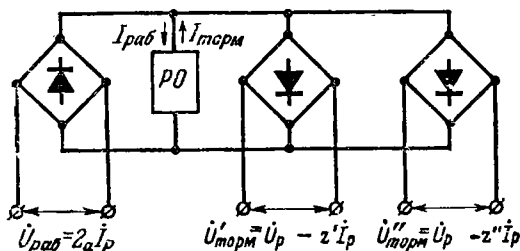


Рис. 11-11. Направленное реле сопротивления с эллиптической характеристикой, на сравнении трех напряжений.

рабочее $\dot{U}_{раб} = 2a\dot{I}_p$ и два тормозных $\dot{U}'_{торм} = \dot{U}_p - z'\dot{I}_p$ и $\dot{U}''_{торм} = \dot{U}_p - z''\dot{I}_p$. Токи, создаваемые тормозными напряжениями, суммируются и с помощью схемы сравнения сопоставляются с рабочим током. В качестве исполнительного органа $РД$ служит нуль-индикатор.

Ток в исполнительном органе $I_p = |\dot{I}_{раб}| - |\dot{I}_{торм}|$. Пограничным условием начала работы реле является равенство

$$I_{PO} = |\dot{I}_{раб}| - |\dot{I}_{торм}| = 0. \quad (11-17)$$

Имея в виду, что токи пропорциональны создающим их напряжениям, заменим $I_{раб}$ и $I_{торм}$ соответствующими напряжениями,

тогда уравнение срабатывания (11-17) примет вид:

$$2aI_p = |\dot{U}_p - z' \dot{I}_p| + |\dot{U}_p - z'' \dot{I}_p|.$$

Деля все члены этого уравнения на I_p и заменяя U_p/I_p на $z_{с.р}$, получаем:

$$|z_{с.р} - z'| + |z_{с.р} - z''| = 2a.$$

Найденное уравнение срабатывания совпадает с (11-5) и является уравнением эллипса, проходящего через начало координат с большей осью, равной $2a$.

Сопротивления z' и z'' являются векторами, определяющими положение фокусов эллипса.

Рассмотренный способ выполнения реле с эллиптической характеристикой относительно сложен.

Ниже приводится более простое выполнение реле с эллиптической (овальной) характеристикой.

д) Реле на сравнении величин двух напряжений с использованием переменной составляющей выпрямленных напряжений (или токов)

Реле выполняется так же, как и рассмотренные выше направленные реле сопротивления с круговой характеристикой (рис. 11-10).

Отличительными особенностями конструкции, позволяющими получить вместо круговой эллиптическую характеристику, являются:

1) использование переменной составляющей выпрямленного тока, в связи с чем пульсация последнего не сглаживается, а, наоборот, сохраняется;

2) применение в качестве реагирующего органа нуля-индикатора замедленного действия.

Упрощенная схема такого реле показана на рис. 11-12. К реле подводятся два напряжения: $\dot{U}_I = \dot{U}_p - z' \dot{I}_p$ и $\dot{U}_{II} = z' \dot{I}_p$. Первое является тормозным, а второе — рабочим.

Схема сравнения их величин может выполняться на балансе токов или, как показано на рис. 11-12, на балансе напряжений. В последнем случае напряжение на выходе схемы

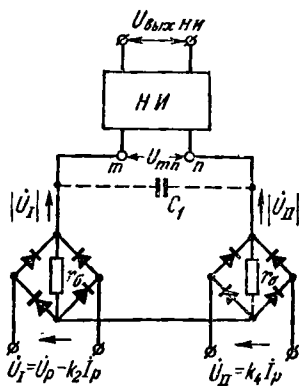


Рис. 11-12. Реле с эллиптической характеристикой, основанное на использовании переменной составляющей выпрямленного тока.

$$\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|. \quad (11-18)$$

Это напряжение подводится к зажимам нуль-индикатора *НИ*, работающего с выдержкой времени $t = 0,01$ с.

Выходное напряжение. В схеме не предусматривается сглаживающего устройства, поэтому выпрямленные напряжения $|\dot{U}_I|$ и

$|\dot{U}_{II}|$ и выходное напряжение $\dot{U}_{mn}$ имеют пульсирующий характер (рис. 11-13, а и б) и состоят из постоянной и переменной составляющих (см. § 2-15).

Из схемы сравнения и выражения (11-18) следует, что постоянная составляющая выходного напряжения U_{mn} равна разности по-

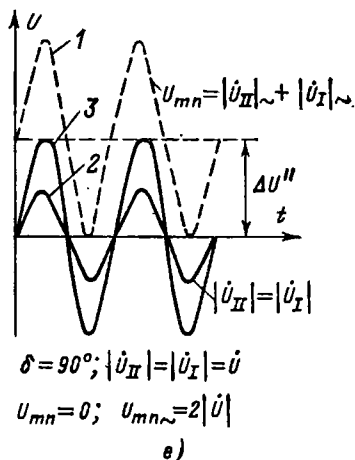
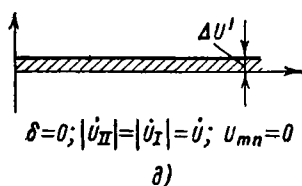
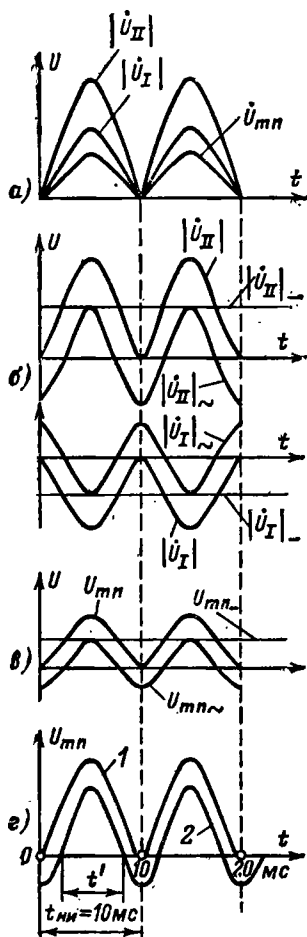


Рис. 11-13. Напряжение U_{mn} на входе нуль-индикатора и его составляющие (постоянная U_{mn-} и переменная $U_{mn\sim}$) при различных углах сдвига δ между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

стоянных составляющих сравниваемых напряжений $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$:

$$U_{mn-} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|, \quad (11-18a)$$

а переменная составляющая U_{mn} ($U_{mn\sim}$) — геометрической разности переменных слагающих $|\dot{U}_{II}\sim|$ и $|\dot{U}_I\sim|$:

$$U_{mn\sim} = |\dot{U}_{II}\sim| - |\dot{U}_I\sim|. \quad (11-18б)$$

Как видно из (11-18а), величина постоянной составляющей выходного напряжения U_{mn} зависит только от абсолютных значений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, которыми определяются величины их постоянных слагающих.

Величина же переменной слагающей U_{mn} , определяемая геометрической разностью составляющих $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$, зависит как от величины этих составляющих, так и от сдвига фаз δ' между ними.

Величины $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ в свою очередь определяются величиной сравниваемых напряжений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, а δ' углом δ между ними, поэтому переменная составляющая на входе нуль-индикатора в конечном счете зависит от величины и сдвига фаз между сравниваемыми напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Переменная слагающая выпрямленного напряжения приближенно равна его второй гармонике (см. § 2-15) и имеет поэтому в 2 раза большую частоту по сравнению с выпрямляемым напряжением. В результате этого при $\delta = \omega t$ $\delta' = 2\omega t$, т. е. $\delta' = 2\delta$.

При $\delta = 0$ или 180° $\delta' = 0$ или 360° , в этом случае переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ совпадают по фазе и направлены в контуре схемы сравнения встречно, поэтому напряжение U_{mn} равно арифметической разности их абсолютных значений и будет меньше, чем при других значениях δ .

При $\delta = 90$ или 270° $\delta' = 180$ или 540° , переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ противоположны по фазе и направлены в контуре схемы сравнения в одну сторону, вследствие чего U_{mn} равно арифметической сумме $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$. В этом случае переменная слагающая U_{mn} на зажимах нуль-индикатора имеет максимальное значение.

При $\delta > 0$, но меньше 90° , $\delta' > 0$, но меньше 180° ; напряжение U_{mn} равно геометрической разности $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ и имеет промежуточное (между максимальным и минимальным) значение.

Из сказанного следует, что величины U_{mn} и U_{mn} результирующего есть функция угла δ .

Условия срабатывания реле. Время действия нуль-индикатора $t_{ни}$ принято равным периоду переменной слагающей 100 Гц (который равен 0,01 с). При таком исполнении нуль-индикатор может сработать только в случае, если $U_{mn} = U_{mn} - U_{mn}$ имеет положительное значение в течение времени действия нуль-индикатора $t_{ни} = 0,01$ с (кривая 1 на рис. 11-13, з).

Следовательно, для срабатывания рассматриваемого реле необходимо выполнить два условия:

первое, как обычно для реле на сравнении двух величин,

$$|\dot{U}_{II}| \geq |\dot{U}_I| \quad (11-19)$$

и второе, обусловленное замедлением нуль-индикатора,

$$t_{\text{вых. пол}} \geq t_{ни} = 0,01 \text{ с}, \quad (11-19а)$$

где $t_{\text{вых.пол}}$ — продолжительность непрерывного положительного импульса выходного напряжения U_{mn} .

Графически условия срабатывания показаны на рис. 11-13, г. Кривая 1 напряжения U_{mn} соответствует началу работы реле, так как при этом $t_{\text{вых.пол}} = t_{\text{ин}}$. Если кривая U_{mn} расположена выше кривой 1, $t_{\text{вых.пол}}$ увеличивается и условия работы реле улучшаются, если же кривая U_{mn} окажется ниже (кривая 2), то условие (11-19а) не выполняется $t_{\text{вых.пол}} < t_{\text{ин}}$ и реле работать не будет.

Поскольку $U_{mn} = U_{mn-} - U_{mn\sim}$, то для обеспечения пограничных (начальных) условий действия реле необходимо иметь такое преобладание U_{II} над U_I , при котором синусоида $U_{mn\sim}$ займет предельное положение, совпадающее с кривой 1 на рис. 11-13, г.

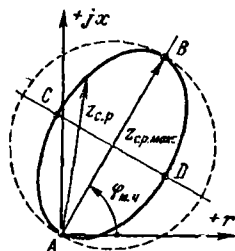


Рис. 11-14. Эллиптическая характеристика реле по рис. 11-12.

Сопротивление срабатывания. Покажем, что ΔU (равное $U_{II} - U_I$), а следовательно, и $z_{с.р}$ зависят от угла δ сдвига фаз между $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$. Действительно, при совпадении фаз $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, когда $\delta = 0$, пограничным условием действия реле будет равенство $U_{II} = U_I$. В этом случае постоянные и переменные слагающие U_{mn} равны разности соответствующих составляющих $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$, вследствие чего $\dot{U}_{mn} = 0$. Реле в этом случае обладает наибольшей чувствительностью, так как для его срабатывания

достаточно незначительное превосходство U_{II} над U_I (рис. 11-13, д). Соответствующее этому $z_{с.р}$ показано на рис. 11-14, вектором $z_{с.р.макс}$ с углом $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$. Это $z_{с.р} = z'$, что следует из рассмотрения уравнений (11-19).

При $\delta \neq 0$ в U_{mn} появляется переменная составляющая $U_{mn\sim}$, достигающая максимального значения при $\delta = 90^\circ$, когда $U_{mn\sim} = |\dot{U}_{II}|_{\sim} + |\dot{U}_I|_{\sim}$.

При $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$ постоянная составляющая $U_{mn-} = 0$ и к нуль-индикатору подводится только $U_{mn\sim}$, расположенное симметрично относительно нулевой линии (кривая 2 на рис. 11-13, е). Условие (11-19а) не выполняется, и реле не работает. Для срабатывания реле необходимо увеличить $\dot{U}_{II}$ на величину $\Delta U''$, так чтобы кривая напряжения U_{mn} не имела отрицательных значений (рис. 11-13, е). Условие срабатывания реле для этого случая можно выразить равенством

$$|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I| + \Delta U''. \quad (11-19б)$$

Срабатывание реле в этом случае произойдет при большем U_{II} , а следовательно, и I_p , так как $U_{II} = kI_p$, чем это должно быть при $\delta = 0$ [уравнение (11-19)]. Это означает, что $z_{с.р}$ при $\delta \neq 0$ будет

меньше, чем при $\delta = 0$, а угол φ_p вектора $z_{c.p}$ будет отличаться от $\varphi_{м.ч.}$, т. е. $\varphi_p \neq \varphi_{м.ч.}$.

Чем ближе к 90° будет δ , тем больший избыток $U_{II} (\Delta U)$ необходим для работы реле, соответственно будет увеличиваться I_p и уменьшаться $z_{c.p}$.

Сопротивления $z_{c.p}$, а следовательно, и чувствительность реле имеют наименьшее значение при $\delta = 90^\circ$, так как амплитуда U_{mn} в этом случае будет равна арифметической сумме $U_{II} + U_{I\sim}$ и достигнет наибольшего значения, чему соответствует максимальная величина ΔU в (11-196).

Характеристика реле. Таким образом, когда $\delta = 0$, реле имеет наибольшую чувствительность (рис. 11-14) и его зона действия равна $z_{ср.макс} = z'$, т. е. равна диаметру AB окружности, а когда $\delta \neq 0$, чувствительность реле уменьшается и его зона действия сокращается, так как для срабатывания реле при том же U_p необходимо большее, чем в предыдущем случае, увеличение I_p (т. е. U_{II}). При этом $z_{c.p}$ получается меньшее, чем $z_{ср.макс}$ (диаметра окружности), что приводит к сжатию окружности и превращает ее в эллипс (рис. 11-14).

Степень сжатия окружности характеризуется величиной малой оси эллипса, ее можно изменять, включая емкость C_1 , которая меняет относительное значение переменной составляющей в выпрямленном токе.

Подобная конструкция реле сопротивления разработана ВНИИЭ [Л. 47] и применяется в дистанционных защитах ДЗ-2, выпускаемых ЧЭАЗ.

11-7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

а) Электромагнитное реле полного сопротивления

Реле (рис. 11-15) состоит из двух электромагнитов 1 и 2, подвижного стального коромысла 3, закрепленного на оси 6, контактов 4 и противодействующей пружины 5. Обмотка T питается током I_p , а обмотка H — напряжением сети U_p через трансформатор 7.

На коромысло 3 действуют моменты:

$$M_T = k_T I_p^2 \quad (11-20)$$

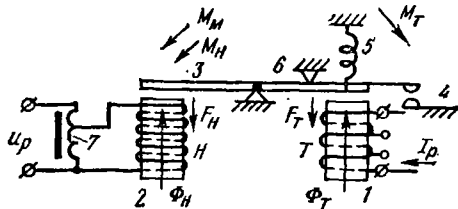


Рис. 11-15. Электромагнитное реле полного сопротивления.

на замыкание контактов реле, от напряжения

$$M_H = k_H U_p^2 \quad (11-21)$$

на их размыкание и механический момент $M_{мех}$ (пружины 5 и трения), противодействующий замыканию контактов.

В нормальном режиме сети отношение $U_p/I_p = z_p$ таково, что $M_T < M_H + M_{\text{мех}}$, при этом $z_p > z_{\text{с.р}}$ и реле не действует. В случае к. з. напряжение U_p уменьшается, ток I_p возрастает и соответственно уменьшается тормозной момент M_H и растет рабочий момент M_T . При $z_p \leq z_{\text{с.р}}$ момент $M_T \geq (M_H + M_{\text{мех}})$, реле срабатывает, замыкая свои контакты.

Пограничным условием начала работы реле является равенство моментов $M_T = M_H + M_{\text{мех}}$, при этом $z_p = z_{\text{с.р}}$. Пренебрегая моментом $M_{\text{мех}}$, с учетом (11-20) и (11-21) получаем:

$$k_T I_p^3 = k_H U_p^2.$$

Разделив обе части этого уравнения на k_H и I_p^3 , найдем сопротивление, при котором происходит срабатывание реле:

$$z_{\text{с.р}} = \frac{U_p}{I_p} = \sqrt{\frac{k_T}{k_H}}. \quad (11-22)$$

Уравнение (11-22) показывает, что $z_{\text{с.р}}$ реле имеет постоянную величину, не зависящую от φ_p . Характеристика такого реле изображается окружностью с радиусом $\sqrt{k_T/k_H}$ и центром в начале координат (рис. 11-7, а). Таким образом, рассмотренное реле является ненаправленным реле сопротивления.

Если в (11-22) учесть $M_{\text{мех}}$, то

$$z_{\text{с.р}} = \sqrt{\frac{k_T}{k_H} - \frac{M_{\text{мех}}}{k_H I_p^3}}. \quad (11-22a)$$

Из этого выражения следует, что благодаря наличию механического момента $z_{\text{с.р}}$ зависит от I_p .

б) Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле

Устройство реле. Реле выполнено на четырехполюсной магнитной системе с цилиндрическим ротором (рис. 11-16), применяемой для реле мощности. На магнитопроводе реле расположены две обмотки 1 и 2.

Обмотка 1 питается напряжением

$$\dot{U}_I = \dot{U}'_p + \dot{E}, \quad (11-23)$$

а обмотка 2 — напряжением

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}'_p - \dot{E}, \quad (11-24)$$

где $\dot{U}'_p$ — напряжение, пропорциональное напряжению сети $\dot{U}_p$; $\dot{E}$ — э. д. с., пропорциональная току сети I_p .

Напряжение U_p подводится к реле через автотрансформатор АТН с регулируемым коэффициентом трансформации k_H :

$$\dot{U}'_p = k_H \dot{U}_p.$$

Электродвижущая сила E создается трансреакторами TP_1 и TP_2 , первичные обмотки которых питаются током I_p . Вторичная э. д. с. трансреактора равна:

$$\dot{E} = -jk_T \dot{I}_p, \quad (11-25)$$

она отстает от индуктирующего ее тока I_p на 90° и пропорциональна ему по величине (рис. 11-16, б).

При этом условии коэффициент k_T , характеризующий взаимную индукцию между первичной и вторичной обмотками трансреактора, имеет постоянное значение.

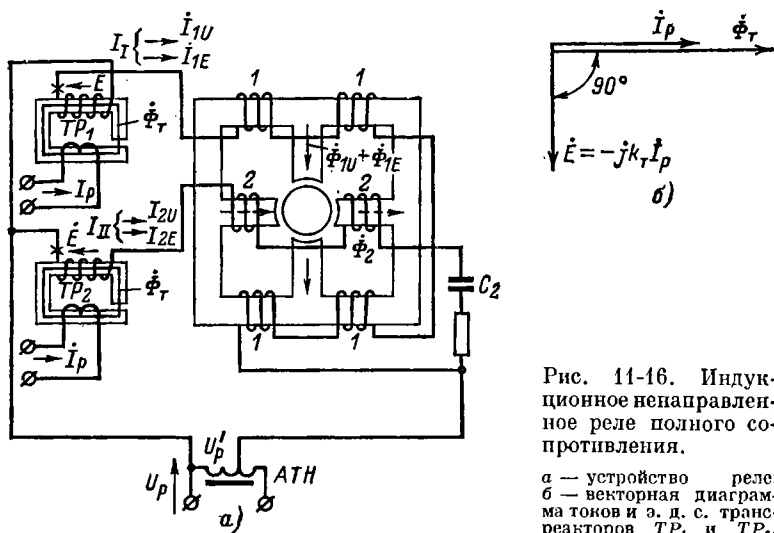


Рис. 11-16. Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления.

а — устройство реле;
б — векторная диаграмма токов и э. д. с. трансреакторов TP_1 и TP_2 .

Полярность включения вторичных обмоток TP_1 и TP_2 подбирается таким образом, чтобы э. д. с. E и напряжение U'_p имели согласно условиям (11-23) и (11-24) одинаковое направление в цепи обмотки 1 и противоположное в цепи обмотки 2.

Принцип действия реле. Под действием напряжения U_I и U_{II} в обмотках 1 и 2 возникают токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_I &= \frac{\dot{U}'_p + \dot{E}}{z_1} \\ \dot{I}_{II} &= \frac{\dot{U}'_p - \dot{E}}{z_2}, \end{aligned} \quad (11-26)$$

сдвинутые относительно напряжений на углы β_1 и β_2 . Токи I_I и I_{II} образуют магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ . Векторная диаграмма напряжений, токов и потоков реле представлена на рис. 11-17, а. Взаимодействуя с вихревыми токами в подвижной системе, потоки

создают электромагнитный момент (см. § 2-9, б)

$$M_3 = k\Phi_1\Phi_2 \sin \psi. \quad (11-27)$$

Как видно из векторной диаграммы, угол $\psi = \delta - (\beta_1 + \beta_2)$. Параметры цепей обмоток 1 и 2 подобраны при помощи конденсатора C_2 с таким расчетом, чтобы $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$.

При этом угол $\psi = \delta - 90^\circ$, а $\sin \psi = \cos \delta$. С учетом этого, а также имея в виду, что $\Phi_1 = k_1 U_I$, $\Phi_2 = k_2 U_{II}$, выражение (11-27) приводится к виду

$$M_3 = k' U_I U_{II} \cos \delta. \quad (11-28)$$

Из полученного выражения следует, что знак момента реле M_3 зависит от угла δ между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле.

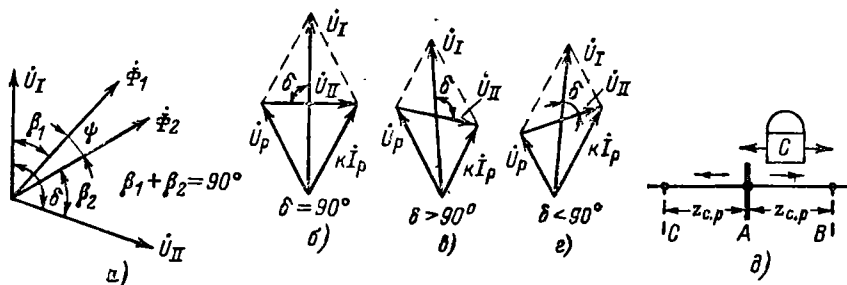


Рис. 11-17. Векторные диаграммы, поясняющие работу реле на рис. 11-16.

Условие начала действия реле, если пренебречь противодействием от механического момента $M_{мех}$, выражается на основе (11-28) равенством $M_3 = 0$.

Из диаграммы рис. 11-17, б видно, что это условие наступит при

$$|k_H \dot{U}_p| = |k_T \dot{I}_p|. \quad (11-29)$$

В этом случае $\delta = 90^\circ$ и, следовательно, $\cos \delta$ и M_3 равны нулю.

Разделив обе части (11-29) на I_p и k_H , получим, что реле начинает работать при сопротивлении

$$z_p = \frac{k_T}{k_H}.$$

При

$$|k_H \dot{U}_p| < |k_T \dot{I}_p| \quad (11-30)$$

согласно диаграмме на рис. 11-17, г угол $\delta < 90^\circ$. Поэтому $\cos \delta > 0$, момент M_3 положителен и действует на замыкание контактов. Разделив обе части неравенства (11-30) на I_p и k_H , найдем, что в этом случае

$$|z_p| < \frac{k_T}{k_H}.$$

Если

$$|k_H \dot{U}_p| > |k_T \dot{I}_p|, \quad (11-31)$$

то, как видно из диаграммы на рис. 11-17, $\alpha, \delta > 90^\circ$. Следовательно, $\cos \delta < 0$ и момент M_δ действует на размыкание контактов реле. Из неравенства (11-31) находим, что при этом $|z_p| > k_T/k_H$.

Таким образом, рассмотренное реле реагирует на угол сдвига δ между напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, питающими обмотки реле, и ведет себя как реле минимального сопротивления, поскольку условием его действия является выражение

$$|z_p| \leq \frac{k_T}{k_H}.$$

Это условие справедливо при любом φ_p . Поэтому характеристика такого реле изображается в осях r, x окружностью с центром в начале координат (рис. 11-7, a) и радиусом $z' = k_T/k_H$.

Если такое реле установить в сети (рис. 11-17, ∂), то оно будет действовать в обе стороны от места установки защиты (точки A), т. е. на участке AB и AC , с сопротивлением

$$z_{AB} = z_{AC} = \frac{k_T}{k_H}.$$

Сопротивление срабатывания реле $z_{с.р}$ можно регулировать изменением k_H или k_T , в первом случае меняется коэффициент трансформации автотрансформатора напряжения ATH , а во втором — число витков первичной обмотки обоих трансреакторов TP_1 и TP_2 .

Рассмотренное реле можно превратить в реле сопротивления со смещенной характеристикой, показанной на рис. 11-7, $в$. Для этого нужно выбрать разную величину коэффициента k_T в трансреакторах TP_1 и TP_2 . В этом случае э. д. с. E , вводимые в цепь обмотки 1 и 2, будут неодинаковы.

Центр окружности у такого реле смещается по отношению к началу координат. На рассмотренном принципе выпускались реле типов КРС-111 и КРС-112.

в) Индукционное направленное реле сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле

Конструкция направленного реле сопротивления изображена на рис. 11-18.

Конструктивно реле выполнено так же, как и предыдущее реле (рис. 11-16), но отличается от него параметрами обмоток и питающими их напряжениями U_I и U_{II} .

Последние образуются из тока и напряжения сети (I_p и U_p) по (11-6), при этом принимается, что $k_1 = k_H$; $k_2 = -z'$; $k_3 = 1$; $k_4 = 0$.

Обмотка 1 называется рабочей, она питается напряжением $\dot{U}_I$, равным разности напряжения сети $\dot{U}_p$ и падения напряжения в сопротивлении зоны действия защиты z' при протекании по нему тока I_p , т. е.

$$\dot{U}_I = k_H \dot{U}_p - \dot{I}_p z', \quad (11-31a)$$

где k_H — коэффициент пропорциональности.

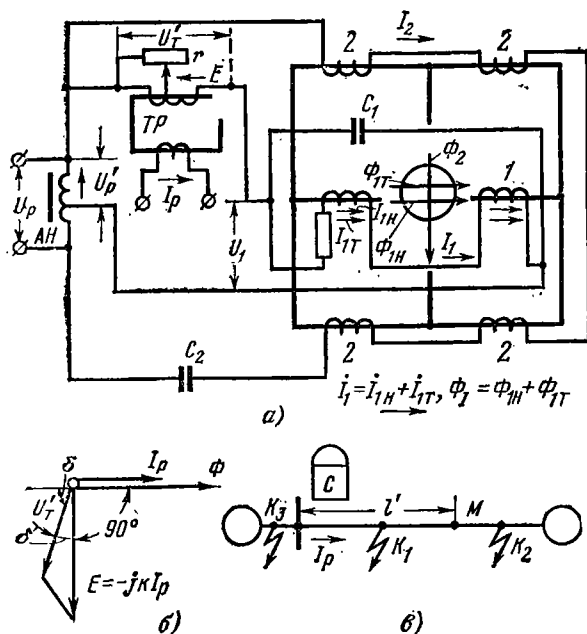


Рис. 11-18. Индукционное направленное реле полного сопротивления.

а — принципиальная схема реле; б — векторная диаграмма трансреактора ТР; в — зона действия реле l' (z'); г — векторная диаграмма токов и магнитных потоков реле.

Падение напряжения $\dot{I}_p z' = \dot{U}'$ называется компенсирующим, так как оно компенсирует в напряжении $\dot{U}_p$ составляющую падения напряжения на сопротивлении участка линии $z_n = z'$. Благодаря компенсации обмотка реле 1 оказывается подключенной не на напряжение $\dot{U}_p$ в месте установки защиты, а на напряжение в конце зоны действия защиты (точка М на рис. 11-18, в).

Вторая обмотка 2 называется поляризующей и питается напряжением

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}_p.$$

Напряжение сети подводится к рабочей обмотке через автотрансформатор АН с коэффициентом трансформации k_H . К поляризующей обмотке напряжение $\dot{U}_p$ подводится непосредственно.

Напряжение компенсации $\dot{U}'$ получается с помощью трансреактора ТР (рис. 11-18, а и б). Благодаря сопротивлению r результирующее напряжение на вторичных зажимах трансреак-

тора $\dot{U}' = \dot{E} + \Delta\dot{U}$ смещено относительно вторичной э. д. с. E на угол δ' .

Величина r подбирается так, чтобы дополнительный угол $\delta = 90^\circ - \delta'$ равнялся углу сопротивления защищаемой линии $\varphi_{\text{л}}$.

При выполнении этого условия напряжение компенсации I_{pz}' будет совпадать по фазе с падением напряжения до места к. з. $\dot{U}_p = \dot{I}_{pz_k}$.

Принцип действия реле. Напряжения U_I и U_{II} вызывают в обмотках реле токи I_I и I_{II} , которые создают магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} , смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ (рис. 11-18). Эти потоки образуют электромагнитный момент

$$M_0 = k\Phi_I\Phi_{II} \sin \psi.$$

Учитывая, что потоки пропорциональны токам, получаем:

$$M_0 = k' I_I I_{II} \sin \psi. \quad (11-32)$$

Величина и знак момента, а следовательно, поведение реле будут определяться углом ψ между токами I_I и I_{II} в обмотках реле.

Ток I_{II} в поляризующей обмотке определяется остаточным напряжением U_p , и его направление в обмотке 2 не меняется. Поэтому угол ψ полностью зависит от тока I_I в рабочей обмотке, направление и фаза которого в свою очередь определяются знаком и фазой напряжения $\dot{U}_I = \dot{U}_p - \dot{I}_{pz}'$.

Векторные диаграммы на рис. 11-19 позволяют определить знак угла ψ . За исходные векторы при построении диаграммы приняты $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$. Ток I_{II} опережает $U_{II} = U_p$ на угол β_2 , а ток I_I отстает от U_I на угол β_1 . Значения β_1 и β_2 определяются параметрами обмоток 1 и 2 и являются постоянными величинами. Знак угла ψ принимается положительным, когда I_I опережает I_{II} , и отрицательным, если I_I отстает от I_{II} .

При к. з. в конце зоны действия реле (точка M на рис. 11-19, а) сопротивление до точки к. з. $z_k = z'$. Поэтому падение напряжения до точки к. з. и напряжение компенсации равны по величине и фазе. В результате этого $\dot{U}_I = \dot{U}_p - \dot{I}_{pz}' = 0$, следовательно, ток и магнитный поток рабочей обмотки (I_I и Φ_I) равны нулю и реле не работает.

При к. з. в зоне до точки M $z_{k1} < z'$, падение напряжения в сопротивлении z_{k1} $U_p < I_{pz}'$, поэтому вектор U_I противоположен $\dot{U}_p$. Как видно из векторной диаграммы (рис. 11-19, б), ток I_I и поток Φ_I опережают I_{II} и Φ_2 , а угол ψ положителен. В результате этого $M_0 > 0$ и реле приходит в действие.

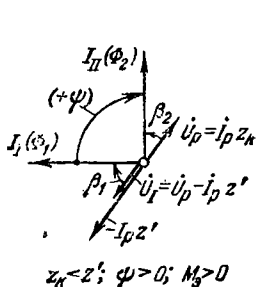
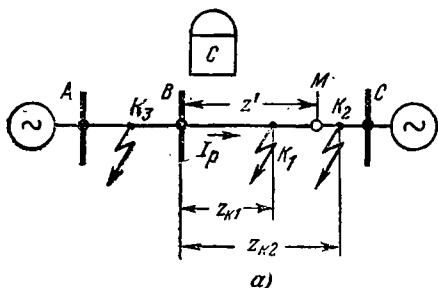
При к. з. за зоной (за точкой M) $z_{k2} > z'$, при этом $U_p > I_{pz}'$, а вектор U_I [см. (11-31а)] совпадает по фазе с U_p . Диаграмма на рис. 11-19, в показывает, что ток I_I вследствие изменения фазы напряжения U_I изменяет свое направление на 180° .

При этом ток I_I и поток Φ_I отстают от I_{II} и Φ_2 , угол ψ становится отрицательным и реле не действует, так как $M_\varphi < 0$.

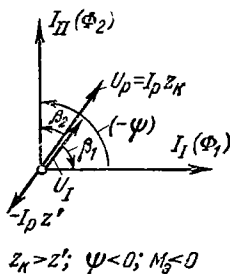
При к. з. за шинами подстанции в точке K_3 мощность к. з. и ток I_p меняют свое направление, в результате чего напряжение компенсации $I_p z'$ становится отрицательным. В этом случае $\dot{U}_I = \dot{U}_p + \dot{I}_p z'$ и совпадает по направлению, как и в предыдущем случае, с вектором $\dot{U}_p$. Из диаграммы на рис. 11-19, а видно, что

ψ имеет отрицательный знак и поэтому реле не работает.

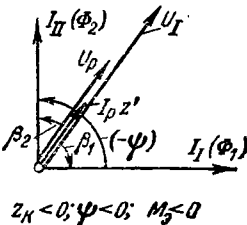
Таким образом, фаза тока в рабочей обмотке зависит от местоположения точки повреждения. Реле работает в пределах зоны, определяемой сопротивлением z' . При переходе к. з. за пределы зоны фаза тока I_I меняет свое на-



б)



в)



г)

Рис. 11-19. Векторные диаграммы токов и магнитных потоков реле при различных случаях к. з.

а — участок защищаемой сети; б — к. з. в пределах зоны защиты (точка K_1); в — к. з. за пределами зоны (точка K_2); г — к. з. за шинами подстанции В (точка K_3).

правление на 180° и реле прекращает действовать. Реле реагирует на направление мощности к. з., так как при к. з. за шинами В оно не работает.

В рассмотренных случаях при металлических к. з. $\varphi_p = \varphi_L = \varphi'$ и благодаря подобранным параметрам обмоток угол ψ между токами I_I и I_{II} равен 90° . Поэтому реле имеет максимальную чувствительность.

При к. з. через дугу, при нагрузке и качаниях $\varphi_p \neq \varphi_L$ напряжение компенсации и U_p не совпадают по фазе, вследствие чего угол ψ между токами I_I и I_{II} отклоняется от 90° . Это вызывает уменьшение момента M_φ и сокращение зоны действия реле.

Таким образом, $z_{c.p}$ зависит от φ_p : при $\varphi_p = \varphi'$ $z_{c.p} = z'$, а при всех других значениях φ_p $z_{c.p} < z'$. Характеристика работы рас-

смотренного реле изображается в осях r, x окружностью, проходящей через начало координат (рис. 11-7, б) с диаметром z' и углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = \varphi'$.

Уравнение срабатывания реле можно определить аналитическим путем. Для этого магнитный поток Φ_1 рабочей обмотки представляется в виде двух составляющих: одной $\Phi_{1н}$, обусловленной напряжением $k_H U_p$, и второй $\Phi_{1т}$, создаваемой напряжением $I_{pz'}$ (рис. 11-18). Взаимодействие этих потоков с потоком $\Phi_2 = U_p$ поляризующей обмотки создает два момента:

$$M_{12} = k' \Phi_2 \Phi_{1н} \sin \psi_1 = k'_1 U_p^2 \text{ и } M_{22} = k'' \Phi_2 \Phi_{1т} \sin \psi_2 = k''_2 U_p I_p \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p).$$

Здесь учтено, что $\psi_2 = \varphi_{м.ч} - \varphi_p$, где $\varphi_{м.ч} = \varphi' = \varphi_л$.

Начало срабатывания реле характеризуется равенством $M_{12} + M_{22} = 0$, откуда после подстановки и преобразования находится сопротивление срабатывания реле согласно (11-33):

$$z_{с.р} = \frac{U_p}{I_p} = \frac{k''_2}{k'_1} \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p). \quad (11-33)$$

Выражение (11-33) представляет уравнение окружности, проходящей через начало координат (рис. 11-7, б) с диаметром $OB = \frac{k''_2}{k'_1} = z_{с.р.макс}$. Оно также показывает, что $z_{с.р}$ зависит от φ_p . Реле имеет максимальную чувствительность (наибольшее $z_{с.р}$) при $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$, которое зависит от угла сопротивления z' . Величина $\varphi_{м.ч}$ может изменяться с изменением сопротивления r в цепи трансреактора (рис. 11-18).

Регулирование $z_{с.р}$ реле производится с помощью автотрансформатора $АН$ изменением его коэффициента трансформации k_H или изменением витков трансреактора, что непосредственно меняет величину z' , т. е. уставку реле.

Мертвая зона. Из выражения (11-32) вытекает, что при $U_p = 0$ U_{II} и Φ_2 равны нулю, в результате чего реле не может работать, так как $M_3 = 0$.

Это означает, что при к. з. в начале линии, когда $U_p = 0$ или очень мало, реле не работает, т. е. имеет мертвую зону. Для устранения мертвой зоны предусматривается устройство, называемое «памятью», осуществляемое с помощью конденсатора C_2 (рис. 11-18). При исчезновении U_p во время близкого к. з. конденсатор C_2 , заряженный предшествующим напряжением, разряжается и посылает ток в обмотку 2. Параметры цепи обмотки подбираются так, чтобы ток разряда конденсатора имел колебательный характер с частотой 50 Гц (рис. 11-20). Затухание тока I_C происходит со временем порядка 2—5 периодов, в течение которых взаимодействие потоков обмоток 1 и 2 создает момент M_3 , достаточный для действия реле. Конденсатор C_1 (рис. 11-18) служит для создания необходимого сдвига фаз между током и напряже-

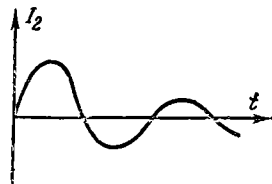


Рис. 11-20. Кривая изменения тока I_2 в обмотке 2 реле на рис. 11-18 при разряде конденсатора C_2 .

нием в обмотке 1 и желаемой величины угла максимальной чувствительности. На рассмотренном принципе ЧЭАЗ выполнялись направленные реле сопротивления типа КРС-131 и КРС-132.

г) Индукционное направленное реле сопротивления для защиты от двухфазных коротких замыканий (компенсационное реле)

Реле и схема его включения предложены советским специалистом А. М. Бреслером. Конструкция реле (рис. 11-21) выполняется аналогично индукционному реле мощности, но отличается от него способом питания обмоток. Реле имеет две обмотки 1 и 2, которые

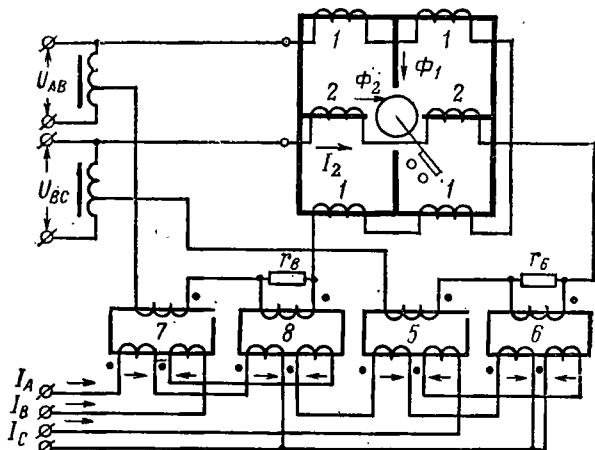


Рис. 11-21. Индукционное реле (системы А. М. Бреслера) для защиты от двухфазных к. з.

питают напряжения U_I и U_{II} . Каждое из этих напряжений представляет собой разность линейного напряжения в месте установки защиты и напряжения компенсации, равного падению напряжения от тока к. з. в заданном сопротивлении защищаемой зоны ¹:

$$\left. \begin{aligned} U_I &= U_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) z'; \\ U_{II} &= U_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) z'. \end{aligned} \right\} \quad (11-34)$$

Реактивная составляющая компенсирующего напряжения получается при помощи трансреакторов 7 и 5. Их вторичные э. д. с. сдвинуты на 90° относительно первичных токов $\dot{I}_{AB} = \dot{I}_A - \dot{I}_B$

¹ Можно считать, что реле питается компенсированными напряжениями U_I и U_{II} , соответствующими напряжению в конце зоны действия защиты (точка M на рис. 11-18, а). Поэтому данное реле часто называется компенсационным.

жающим. В качестве примера на рис. 11-23, б—д показаны векторные диаграммы U_I и U_{II} для указанных выше повреждений при двухфазном к. з. Из диаграмм следует, что при к. з. до точки M реле работает, так как при этом U_{II} опережает U_I и не действует при к. з. в точке M и за ней. Подобный анализ работы реле [Л. 13, 23, 45] показывает, что при всех симметричных режимах (трехфазные к. з., нагрузки и качания) U_{II} отстаёт от U_I , угол δ положителен и реле не действует. При двухфазных к. з. реле работает в пределах зоны, определяемой z' . При $z_R > z'$, а также при направлении мощности к. з. к шинам реле не действует, так как в этих случаях угол δ положителен и U_{II} отстаёт от U_I .

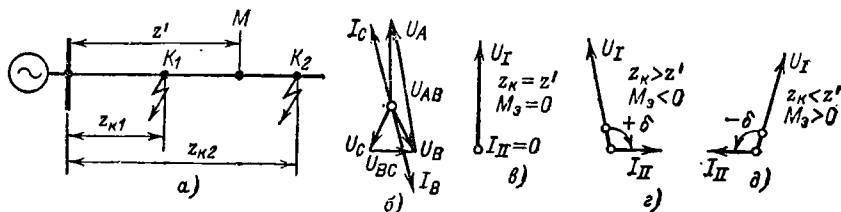


Рис. 11-23. Участок сети и векторные диаграммы к анализу работы реле на рис. 11-21 при двухфазных к. з.

При двухфазных к. з. на землю реле работает в пределах той же зоны, что и при двухфазных замыканиях без земли, обладая направленностью действия. Исследования [Л. 45] показывают, что при близких к. з. реле может не сработать в случае двухфазного к. з. на землю и при определенном сочетании величин z' и тока к. з. Реле реагирует и на однофазные к. з., сохраняя направленность действия. Но в этом случае зона работы реле значительно сокращается, вследствие чего оно не используется для защиты от этого вида повреждений.

Момент реле можно выразить через симметричные составляющие напряжений U_I и U_{II} . В этом случае он получается равным разности квадратов компенсированных напряжений обратной и прямой последовательностей [Л. 13]:

$$M_3 = k (|\dot{U}_2'|^2 - |\dot{U}_1'|^2) = k (|\dot{U}_2 - \dot{I}_{2z'}|^2 - |\dot{U}_1 - \dot{I}_{1z'}|^2), \quad (11-37)$$

где $\dot{U}_1'$ и $\dot{U}_2'$ — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$; $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{BC}$ и токов $\dot{I}_{AB}$ и $\dot{I}_{BC}$.

Как следует из (11-37), условием работы реле является неравенство $|\dot{U}_2 - \dot{I}_{2z'}|^2 > |\dot{U}_1 - \dot{I}_{1z'}|^2$, при котором $M_3 > 0$. Это выражение показывает, что при всех симметричных режимах реле не работает, так как составляющие U_2 и I_2 в этих режимах равны нулю. Выражение (11-37) облегчает анализ работы реле, позволяет вести его аналитически.

Рассмотренное реле может применяться в качестве направленного дистанционного органа от двухфазных к. з. между любыми фазами. Для такого реле не требуется пусковой орган, так как оно не реагирует на нагрузку. Отечественной промышленностью выпускалось реле типа КРС-121, основанное на описанном принципе.

11-8. ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТОК ТОЧНОЙ РАБОТЫ

Точность работы реле сопротивления характеризуется погрешностью $\Delta z = z_y - z_{c.p.}$, которая показывает, насколько действительное $z_{c.p.}$ отличается от уставки реле z_y .

Основными причинами, вызывающими погрешность в работе реле и появление зависимости $z_{c.p.}$ от тока, являются: во-первых, наличие механического момента $M_{мех}$ и других факторов, ограничивающих чувствительность конструкций, и, во-вторых, нелинейность магнитопроводов и выпрямителей в цепях реле.

На рис. 11-24 показан характер зависимости $z_{c.p.}$ от тока I_p и возникающей при этом погрешности Δz .

При отсутствии механического момента и других факторов, ограничивающих чувствительность реле, характеристика срабатывания не зависит от тока I_p и изображается прямой 1 ($z_{c.p.} = z_y$). Действительная характеристика реле представляется кривой 2 .

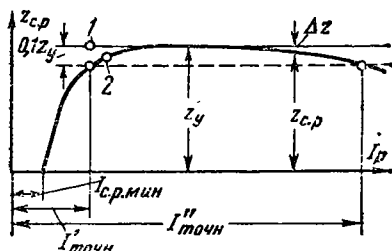


Рис. 11-24. Зависимость $z_{c.p.}$ от тока в реле.

1 — идеальная характеристика; 2 — действительная характеристика.

Рассмотрим ее особенности. При $z_{c.p.} = 0$, имеющем место при $U_p = 0$, реле срабатывает только при определенном значении тока $I_{c.p. мин}$, который должен в этом случае преодолеть сопротивление механического момента и других факторов, обуславливающих конечную чувствительность реле.

При малых токах I_p , соизмеримых с величиной $I_{c.p. мин}$, погрешности реле особенно велики. Это объясняется большим значением погрешности Δz , обусловленной механическим моментом.

По мере увеличения тока I_p значение погрешности Δz уменьшается и в средней части характеристики погрешность становится настолько мала, что ею можно пренебречь, считая, что $z_{c.p.} = z_y$.

При больших значениях I_p начинают проявляться насыщение магнитопроводов и нелинейность выпрямителей, в результате чего погрешность Δz снова нарастает, а $z_{c.p.}$ уменьшается.

Из кривой 2 следует, что *каждое реле сопротивления может работать с достаточной точностью только в определенном диапазоне токов I_p* . Принято, что для дистанционных реле погрешность Δz_p не должна превышать 10%.

Из этого условия по кривой $z_{c.p.} = f(I_p)$ определяются токи точной работы реле $I'_{точн}$ и $I''_{точн}$, при которых погрешность равна 10%, а $z_{c.p.} = 0,9z_y$.

В современных конструкциях ток точной работы в начальной части характеристики $I'_{точн}$ составляет 1—7А.

При выборе уставок реле сопротивления необходимо проверять, что при к. з. в конце зоны действия реле $I_{к.з.мин} \geq I'_{точн}$, а $I_{к.з.макс} \leq I'_{точн}$.

Если эти условия не будут выполнены, то погрешность реле превышает 10%.

11-9. ДИСТАНЦИОННЫЕ ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ

а) Требования к схемам включения

Дистанционные органы, выполняемые с помощью реле сопротивления, должны включаться на ток и напряжение сети по таким схемам, при которых сопротивление z_p на зажимах реле пропорционально расстоянию l_k до места повреждения и не зависит от вида к. з.

Для выполнения поставленных условий напряжение U_p должно равняться падению напряжения до точки к. з. $I_{к.з} z_k$, а ток I_p — току $I_{к.з}$, тогда

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{I_{к.з} z_k}{I_{к.з}} = z_k = z_y l_k.$$

Исходя из этого *дистанционные органы включаются на напряжение и ток петли к. з.* Для обеспечения правильного действия дистанционных органов при двухфазных к. з. нужно установить три органа, реагирующие на повреждения между фазами АВ, ВС и СА. Применяются схемы и с одним дистанционным органом, но в этом случае его нужно переключать на напряжение и токи соответствующих фаз в зависимости от того, какие из них повреждены.

Схемы включения, обеспечивающие при междуфазных к. з. пропорциональность между z_p и l_k , оказываются непригодными в условиях замыканий на землю. Поэтому реле, реагирующие на междуфазные к. з., и реле, предназначенные для защиты от однофазных повреждений, включаются по разным схемам, рассмотренным ниже. Реле, определяющие удаленность места к. з. не по сопротивлению, а по косвенным признакам, как, например, КРС-121, включаются по особым схемам.

б) Включение дистанционных органов, реагирующих на междуфазные к. з.

Включение на междуфазные напряжения и разность фазных токов осуществляется согласно табл. 11-1.

Такой способ включения (рис. 11-25) полностью отвечает поставленным выше условиям, в чем можно убедиться, определив сопротивления на зажимах реле при различных видах междуфазных к. з.

При трехфазном к. з. (рис. 11-26, б) все три дистанционных органа находятся в одинаковых условиях.

К каждому из них подводится междупазное напряжение, равное $\sqrt{3}U_{\phi}$. Фазное напряжение U_{ϕ} равно падению напряжения в проводе фазы от места установки реле до точки к. з.

Отсюда напряжение

$$U_p^{(3)} = \sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1K} = \sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1y} l_K,$$

где $I_K^{(3)}$ — ток трехфазного к. з., проходящий по фазе; z_{1K} — сопротивление прямой последовательности фазы от места установки реле до точки K ; l_K — расстояние до места повреждения; z_{1y} — удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 км.

Ток в каждом реле равен геометрической разности токов двух фаз, т. е. $I_p = \sqrt{3} I_K^{(3)}$, следовательно, сопротивление на зажимах каждого реле

$$z_p^{(3)} = \frac{U_p^{(3)}}{I_p^{(3)}} = \frac{\sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1K}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}} = z_{1K} = z_{1y} l_K.$$

Рис. 11-25. Схема включения дистанционных органов.

При двухфазном к. з., например, между фазами B и C (рис. 11-26, в) только один дистанционный орган, включенный на напряжение между поврежденными фазами B и C , получает напря-

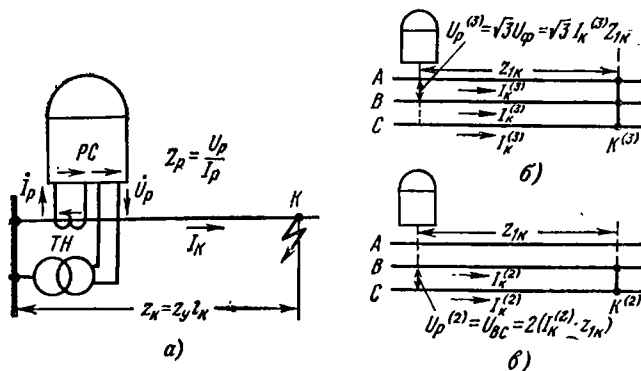


Рис. 11-26. Короткое замыкание на защищаемой линии.

а — схема сети; б — токи и напряжения поврежденных фаз при трехфазном к. з.; в — при двухфазном к. з.

жение, пропорциональное расстоянию l_K . Это напряжение равно падению напряжения в петле к. з., т. е. в фазах B и C , поэтому

$$U_p^{(2)} = U_{BC} = 2 I_K^{(2)} z_{1K}.$$

Ток $I_p^{(2)} = \dot{I}_B - \dot{I}_C = 2\dot{I}_A$. Отсюда находим:

$$z_p^{(2)} = \frac{U_p^{(2)}}{I_p^{(2)}} = \frac{U_{BC}}{I_B - I_C} = \frac{2I_K z_{1K}}{2I_K} = z_{1K} = z_{1Y} l_K.$$

При к. з. на фазах AB и CA $z_p^{(2)}$ находится аналогично и будет также равняться $z_{1K} = z_{1Y} l_K$.

Пользуясь аналогичным методом, можно показать, что и при двухфазных к. з. на землю

$$z_p^{(1,1)} = z_{1K} = z_{1Y} l_K.$$

Таким образом, при всех видах междуфазных к. з. сопротивление на зажимах реле равно сопротивлению прямой последовательности фазы z_{1K} . Следовательно,

$$z_p \equiv l_K \quad \text{и} \quad z_p^{(3)} = z_p^{(2)} = z_{1K},$$

как это и требуется по заданным условиям.

Включение на междуфазное напряжение и фазный ток осуществляется согласно табл. 11-2. Анализируя эту схему, можно убедиться, что при трехфазных к. з. $z_p^{(3)} = \sqrt{3} z_{1K}$, а при двух-

Таблица 11-2

Второй способ

Дистанционное реле фаз	I_p	U_p
AB	I_A	U_{AB}
BC	I_B	U_{BC}
CA	I_C	U_{CA}

фазных — в той же точке $z_p^{(2)} = 2z_{1K}$. Таким образом, данная схема, удовлетворяя первому из заданных условий $z_p \equiv l_K$, не обеспечивает второго условия, так как $z_p^{(3)} \neq z_p^{(2)}$.

Поэтому схема включения на междуфазное напряжение и фазный ток используется лишь для дистанционных органов третьей

зоны, которые обычно совмещаются с пусковыми органами защиты (см. § 11-12). В этом случае нестабильность третьих зон при различных видах к. з. допустима, поскольку третьи зоны являются резервными и работают только при отказе основной защиты.

При обеих схемах включения в случае двухфазного к. з. (рис. 11-26, в) из трех дистанционных органов правильно определяет удаленность повреждения только один, включенный на напряжение между поврежденными фазами.

Например, при к. з. между B и C (рис. 11-25, 11-27), сопротивление на реле II $z_p = z_{1K}$, а на зажимах реле I и III z_p получается преувеличенным, так как подводимые к ним напряжения U_{AB} и U_{CA} (рис. 11-27) превышают напряжение U_{BC} , а питающий их ток (без учета нагрузки) в 2 раза меньше, чем ток $\dot{I}_B - \dot{I}_C$ в реле II . Эти реле ведут себя так, как если бы к. з. произошло дальше действительного места повреждения. Поэтому они не могут вызвать неселективного действия защиты.

Способы включения дистанционных органов на разность токов двух фаз в современных защитах основаны на использовании вспомогательных трансформаторов тока *ВТ* или трансреакторов *ТР* с двумя первичными обмотками 1 и 2 (рис. 11-28). Каждая первичная обмотка включается на ток соответствующей фазы (например, *А* и *В*), так чтобы наводимые ими потоки в сердечнике *ВТ* или *ТР* были направлены встречно и создавали результирующий поток

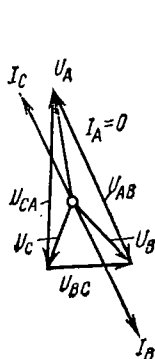


Рис. 11-27. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте установки защиты при двухфазном к. з. на фазах *ВС*.

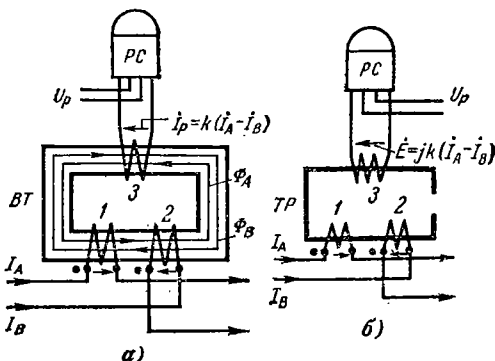


Рис. 11-28. Включение дистанционных органов на разность токов двух фаз.

а — с помощью вспомогательного трансформатора *ВТ*; *б* — с помощью трансреактора *ТР*.

$\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2$, пропорциональный разности токов, питающих первичные обмотки *ВТ* или *ТР*. При этом условии ток вторичных обмоток 3 (или их э. д. с.) будет также пропорционален разности указанных первичных токов.

В защитах, выпускаемых отечественной промышленностью, применяется схема на рис. 11-28, *б*.

в) Включение дистанционных органов, реагирующих на однофазные к. з.

Дистанционные органы, предназначенные для определения удаленности мест однофазных к. з., включаются по так называемой схеме с токовой компенсацией (рис. 11-29, *а*). Схема предусматривает три реле сопротивления, каждое из которых включается согласно табл. 11-3 на напряжение $\dot{U}_\phi$ фаз *А*, *В* и *С* и ток

$$\dot{I}_p = \dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0,$$

где $\dot{I}_\phi$ — ток той же фазы, что и напряжение U_ϕ ; $k3\dot{I}_0$ — ток, пропорциональный току нулевой последовательности.

Коэффициент пропорциональности $k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1}$.

При таком значении k сопротивление на зажимах реле при однофазных к. з. $z_{\text{с.р}} = \frac{\dot{U}_{\Phi}}{i_{\Phi} + k3I_0}$ получается равным z_1 — сопротивлению прямой последовательности до места к. з.

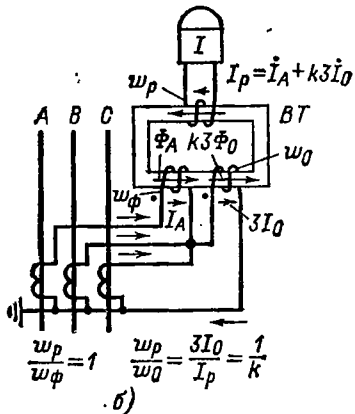
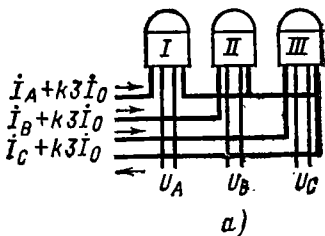


Рис. 11-29. Схема включения дистанционных органов на ток $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$.
а — трехфазная схема включения; б — схема для получения тока $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$.

Для доказательства того, что выбранная схема компенсации обеспечивает $z_p = z_1$, рассмотрим однофазное к. з. (рис. 11-30), например на фазе А. Согласно табл. 11-3 сопротивление на зажимах реле фазы А

$$z_p = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + k\dot{I}_0}. \quad (11-38)$$

Напряжение фазы A в месте установки защиты (в точке P) $\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0$. Каждая составляющая U_1, U_2, U_0 , в точке P равна сумме напря-

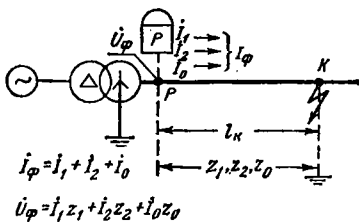


Рис. 11-30. Однофазное к. з.

жения соответствующей последовательности в точке K и падения напряжения той же последовательности на участке KP . Отсюда

$$\dot{U}_A = (\dot{U}_{1K} + \dot{I}_1 z_1) + (\dot{U}_{2K} + \dot{I}_2 z_2) + (\dot{U}_{0K} + \dot{I}_0 z_0),$$

где $\dot{U}_{1K}$, $\dot{U}_{2K}$, $\dot{U}_{0K}$ — напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке K ; $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$, $\dot{I}_0$ — симметричные составляющие тока к. з.; z_1 ,

Таблица 11-3

Реле фаз	Напря- жение	Ток
<i>A</i>	U_A	$i_A + k3i_0$
<i>B</i>	U_B	$i_B + k3i_0$
<i>C</i>	U_C	$i_C + k3i_0$

z_2, z_0 — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей участка КР.

Учитывая, что на поврежденной фазе $\dot{U}_{1K} + \dot{U}_{2K} + \dot{U}_{0K} = 0$, получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_0 z_0. \quad (11-39)$$

Прибавляя и отнимая в правой части уравнения (11-39) $I_0 z_1$ и учитывая, что для линий сопротивление $z_1 = z_2$ и что для фазы А сумма

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \dot{I}_A,$$

получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A z_1 + \dot{I}_0 (z_0 - z_1); \quad (11-39a)$$

подставляя полученное значение $\dot{U}_A$ в (11-38), получаем:

$$z_p = \frac{z_1 \left[\dot{I}_A + \left(\frac{z_0 - z_1}{3z_1} \right) 3\dot{I}_0 \right]}{\dot{I}_A + k3\dot{I}_0}. \quad (11-40)$$

Принимая

$$k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1},$$

получаем:

$$z_p = z_1 = z_{1y} l_{p.к.} \quad (11-41)$$

Выражение (11-41) справедливо для замыкания на землю как одной фазы, так и двух фаз. Таким образом, *сопротивление на зажимах реле, включенного по схеме с токовой компенсацией, пропорционально расстоянию до места к. з. l_k и не зависит от вида замыкания на землю и от соотношения токов I_0 и I_ϕ .*

Поэтому схема с токовой компенсацией полностью отвечает требованиям, предъявляемым к дистанционным органам, и получила всеобщее распространение.

При однофазном к. з. правильно работает только одно реле, включенное на напряжение и ток поврежденной фазы. Два других реле, включенные на ток и напряжение неповрежденных фаз, имеют $z_p > z_1$, что не вызывает неселективного действия.

При включении реле на фазный ток и напряжение без токовой компенсации (рис. 11-30) с учетом (11-39a) получим, что

$$z_p = \frac{U_\phi}{I_\phi} = z_1 + \frac{I_0}{I_\phi} (z_0 - z_1).$$

В этом случае $z_p \neq z_1$ и имеет нестабильное значение, зависящее от отношения I_0/I_ϕ .

Для выполнения токовой компенсации часто применяется схема, приведенная на рис. 11-29, б. Реле питается током через промежуточный трансформатор или трансреактор ТР с двумя первичными обмотками. Одна из них w_ϕ включена на ток фазы I_ϕ , а вторая w_0 — на ток $3I_0$. Их число витков подбирается так, чтобы отношение $w_\phi/w_0 = 1/k$. Результирующий поток первичных обмоток $\dot{\Phi}_{рез} = \dot{\Phi}_\phi + k\dot{\Phi}_0 \equiv I_\phi + k3I_0$, поэтому вторичный ток трансформатора или вторичная э. д. с. трансреактора будут пропорциональны току $I_\phi + k3I_0$.

Коэффициент k является величиной комплексной, поскольку z_0 и z_1 могут иметь различные углы (соотношения x и r). Поэтому токи $3I_0$ и $k3I_0$

должны иметь соответствующий сдвиг по фазе. Учитывая, однако, что угловой сдвиг между z_0 и z_1 невелик, им без большой погрешности пренебрегают, как это сделано в рассмотренной схеме. Обычно $k < 1$.

г) Условия работы дистанционных органов при двойных замыканиях на землю

В сети с малым током замыкания на землю дистанционные защиты должны реагировать на междуфазные к. з. и их дистанционные органы включаются на междуфазные напряжения и разность фазных токов. Как указывалось, в таких сетях возможны двойные замыкания на землю (рис. 11-31). *Защита в этом случае должна отключать только одно место повреждения.*

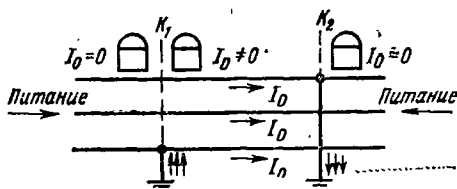


Рис. 11-31. Условия работы дистанционных органов при двойном к. з. на землю.

На участке между двумя точками повреждения дистанционные органы включены на фазное напряжение по схеме с токовой компенсацией, а на участке между точкой повреждения и источником питания — на линейное напряжение и разность фазных токов. Для этого дистанционные органы нормально и при отсутствии I_0 включены на линейное напряжение и разность фазных токов. При появлении тока нулевой последовательности, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю (K_1 и K_2), дистанционные органы, установленные на этом участке, автоматически переключаются на напряжение фазы и ток $\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0$.

11-10. УПРОЩЕННЫЕ СХЕМЫ С УМЕНЬШЕННЫМ ЧИСЛОМ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

а) Трехсистемные и односистемные схемы включения дистанционных органов

Дистанционные реле относятся к числу сложных реле, в связи с этим были разработаны схемы, позволяющие уменьшить количество дистанционных органов в защите.

Описанные в § 11-9 способы включения дистанционных органов были рассчитаны на три реле. Схемы с тремя органами называются **т р е х с и с т е м н ы м и**.

С целью упрощения можно применять схемы с одним дистанционным органом (**о д н о с и с т е м н ы е**). В односистемных схемах для правильной работы дистанционных органов их необ-

ходимо автоматически переключать на напряжения и токи соответствующих фаз в зависимости от того, на каких из них возникло повреждение. Так, например, в односистемной схеме при двухфазном к. з. между фазами A и B к дистанционному органу должны подводиться напряжение U_{AB} и ток $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, при к. з. между B и $C - U_{BC}$ и $\dot{I}_B - \dot{I}_C$.

При двойных замыканиях в разных точках сети с малым током замыкания на землю на участке, где $I_0 = 0$, к реле должны подводиться те же токи и напряжения, что и в предыдущем случае, а на участке, где $I_0 \neq 0$, реле должно включаться на фазное напряжение $\dot{U}_\phi$ и ток $\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0$ согласно табл. 11-3.

Указанные переключения производятся с помощью промежуточных реле, управляемых пусковыми органами защиты.

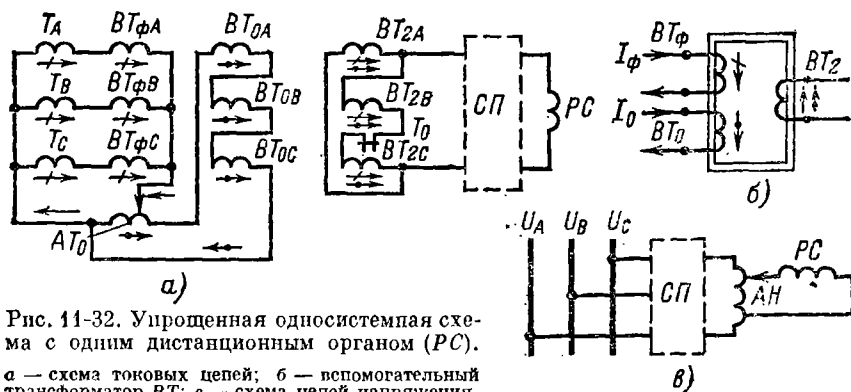


Рис. 11-32. Упрощенная односистемная схема с одним дистанционным органом (РС).
 а — схема токовых цепей; б — вспомогательный трансформатор ВТ; в — схема цепей напряжения.

Для этого каждое пусковое реле должно работать только при повреждении на определенных фазах. Такое свойство пусковых органов называется избирательностью.

На рис. 11-32 показана упрощенная односистемная схема с переключениями в цепях тока и напряжения дистанционного органа защиты (РС). Эта схема применяется в защите, предназначенной для сети с малым током замыкания на землю.

Для облегчения работы контактов переключающих реле при больших токах к. з. 50—100 А токовые цепи реле РС питаются через вспомогательные понизительные трансформаторы тока ВТ (рис. 11-32). Каждый из этих трансформаторов имеет две первичные обмотки ВТ_ф и ВТ₀ и одну вторичную ВТ₂. Обмотка ВТ_ф питается током I_ϕ соответствующей фазы, а обмотка ВТ₀ током I_0 , получаемым через автотрансформатор АТ₀.

Ток первичных обмоток I_ϕ и ток I_0 трансформируются во вторичную обмотку ВТ₂, в последней появляется ток

$$I_2 = \frac{\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0}{n_{ВТ}}.$$

При междуфазных к. з. без земли $I_0 = 0$, в этом случае ток $I_2 = I_\Phi / n_{BT}$.

Коэффициент трансформации n_{BT} обычно принимается равным 25. В результате трансформации токи, питающие реле PC , уменьшаются в 25 раз, что весьма существенно облегчает работу контактов промежуточных реле, производящих переключения в токовых цепях PC .

Обмотки BT_{2A} , BT_{2B} и BT_{2C} соединены в треугольник, цепь которого проходит через нормально замкнутый контакт токового реле T_0 , реагирующего на ток $3I_0$. При междуфазных к.з. реле T_0 не работает и при действии пусковых реле поврежденных фаз к PC подводится разность токов двух поврежденных фаз, получаемых от соответствующих обмоток BT_2 (для упрощения чертежа схема переключений $СП$ на рис. 11-32 не показана).

При двойном замыкании на землю появляется ток I_0 , реле T_0 срабатывает и в зависимости от положения контактов пусковых реле к PC подводится сумма тока поврежденной фазы и тока компенсации $k3I_0$, получаемых от соответствующей обмотки BT_2 .

Переключения в цепях напряжения реле PC (рис. 11-32, *в*) выполняются также с помощью пусковых реле. Они производят необходимые переключения в цепях напряжения дистанционного органа так, чтобы к автотрансформатору $АН$ подводилась разность напряжений поврежденных фаз в случае междуфазного к. з. и напряжение поврежденной фазы при двойных замыканиях на землю. Одностисменные схемы получили значительное распространение. Более подробно они рассмотрены в [Л. 13, 23, 44].

б) Использование одного комплекта дистанционных органов для нескольких зон

Наиболее часто один комплект дистанционных органов используется для первой и второй зоны. Это позволяет в 2 раза уменьшить число дистанционных органов в защите и поэтому широко применяется на практике.

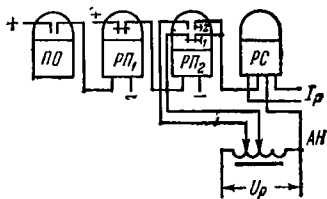


Рис. 11-33. Схема с одним комплектом реле сопротивления для первой и второй зоны.

Схемы с использованием одного комплекта реле сопротивления для двух зон основаны на том, что нормально дистанционные органы включены с уставкой первой зоны; при к. з. за пределами первой зоны уставка реле автоматически изменяется с первой на вторую зону. Изменение уставки осуществляется пусковыми реле после истечения времени, необходимого для действия первой зоны. На рис. 11-33 приведена типовая схема (для одной фазы), осуществляющая автоматическое изменение уставки на дистанционном органе. Нормально к реле сопротивления PC подво-

дится ток I_0 , реле T_0 срабатывает и в зависимости от положения контактов пусковых реле к PC подводится сумма тока поврежденной фазы и тока компенсации $k3I_0$, получаемых от соответствующей обмотки BT_2 .

дится напряжение, соответствующее уставке первой зоны, от автотрансформатора $АН$ через нижний размыкающий контакт 2 промежуточного реле $РП_2$. Это реле непрерывно питается током через размыкающий контакт промежуточного реле $РП_1$, управляемого пусковым органом защиты $ПО$.

При к. з. пусковое реле $ПО$ приходит в действие и реле $РП_1$ размыкает цепь обмотки реле $РП_2$. Последнее работает (отпадает) с выдержкой времени около 0,15 с, достаточной для действия первой зоны, и переключает реле $РС$ на ответвление $АН$, соответствующее уставке второй зоны. Если к. з. было в первой зоне, то $РС$ срабатывает до того, как $РП_2$ переключит его уставку. Если к. з. произошло за пределами первой зоны, то после переключения уставки $РС$ получит возможность действовать с уставкой второй зоны.

11-11. ПРИЧИНЫ, ИСКАЖАЮЩИЕ РАБОТУ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

На работу дистанционных органов оказывают воздействие некоторые факторы, искажающие величины z_p так, что при этом нарушается пропорциональность между z_p и расстоянием l_k до места к. з. Эти искажения необходимо учитывать при выборе уставок во избежание нарушения селективности и недопустимого сокращения зон действия защиты.

а) Влияние переходного сопротивления

Переходное сопротивление в месте к. з. (рис. 11-34) обуславливается главным образом появлением электрической дуги, имеющей активное сопротивление r_d . Сопротивление на зажимах реле $РС$ при электрической дуге в месте повреждения при двухфазном

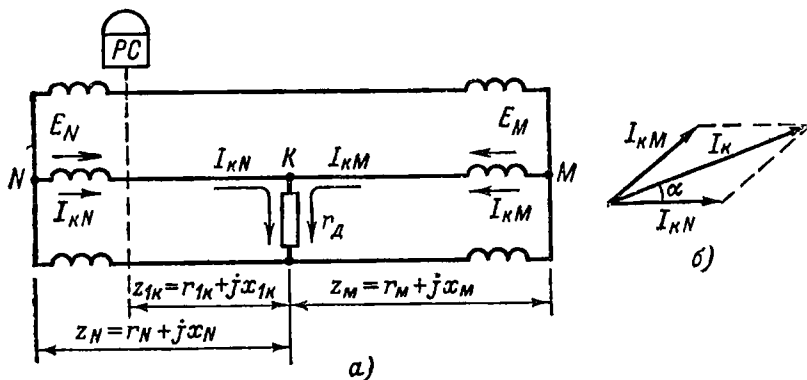


Рис. 11-34. Влияние электрической дуги в месте к. з. на сопротивление z_p , z_{1K} , r_{1K} , x_{1K} — сопротивление линии между точкой K и местом установки защиты.

к. з., как это видно из рис. 11-34, равно:

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{2\dot{I}_{KN}z_1 + \dot{I}_{KR}r_d}{2\dot{I}_{KN}} = z_1 + \frac{\dot{I}_{KR}r_d}{2\dot{I}_{KN}} = z_{1K} + \Delta z, \quad (11-42)$$

где z_{1K} — сопротивление прямой последовательности до места к. з.; r_d — сопротивление электрической дуги; $\dot{I}_{KN}$ — ток к. з. от источника питания N , проходящий через реле; $\dot{I}_K$ — ток к. з., протекающий через дугу, равный $\dot{I}_{KN} + \dot{I}_{KM}$; $\Delta z = \dot{I}_{KR}r_d$, при этом

$$\dot{I}_{KR} = \frac{\dot{I}_K}{2\dot{I}_{KN}}.$$

В общем случае из-за подпитки места повреждения с противоположной стороны током I_{KM} $\Delta z > r_d$ и сдвинуто относительно него на угол α , равный углу сдвига между векторами $\dot{I}_K$ и $\dot{I}_{KN}$. Сдвиг по фазе между $\dot{I}_{KM}$ и $\dot{I}_{KN}$, обуславливающий сдвиг на угол α между токами $\dot{I}_K$ и $\dot{I}_{KN}$, возникает вследствие несовпадения фаз между э. д. с. $\dot{E}_N$ и $\dot{E}_M$, различия углов сопротивления z_N и z_M и различия в соотношениях симметричных составляющих токов $\dot{I}_{KN}$ и $\dot{I}_{KM}$. С учетом сказанного из выражения (11-42) следует, что реле полного сопротивления воспринимают появление переходного сопротивления как удаление действительного места к. з. на величину Δz .

В результате этого зона действия реле сокращается и возникает возможность отказа защиты в конце расчетной зоны и неселективной работы предыдущих защит. Величина сопротивления дуги не поддается точной оценке.

В начальный момент повреждения длина электрической дуги минимальна, в дальнейшем дуга удлиняется, вследствие чего сопротивление r_d возрастает. Поэтому на защиту с выдержкой времени дуга оказывает большее влияние, чем на защиты, действующие мгновенно.

б) Влияние токов подпитки от промежуточных подстанций

В ряде случаев между местом установки защиты и точкой повреждения оказываются включенными источники питания N , дающие дополнительный ток I_{KN} к месту к. з. (рис. 11-35, а). Этот ток не проходит через реле, но, создавая дополнительное падение напряжения в сопротивлении поврежденного участка, увеличивает напряжение на зажимах реле, а вместе с током I_p .

Напряжение на реле с учетом подпитки равно:

$$U_p = I_{KM}z'_{1\lambda} + (I_{KM} + I_{KN})z''_{1K}.$$

Ток в реле

$$I_p = I_{KM},$$

отсюда

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = z'_{1л} + \frac{I_{KM} + I_{KN}}{I_{KM}} z''_{1к} = z'_{1л} + k_p z''_{1к}. \quad (11-43)$$

Коэффициент $k_p = \frac{I_{KM}}{I_{KM}} > 1$ называется коэффициентом распределения (или подпитки¹).

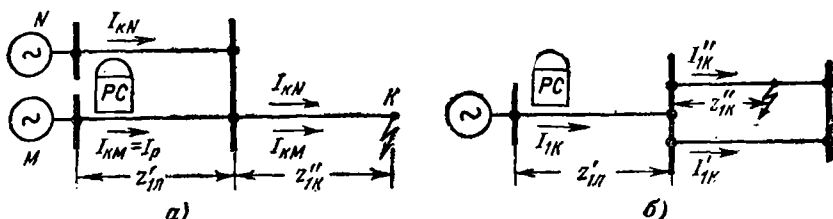


Рис. 11-35. Искажение замеров дистанционных органов.

а — вследствие подпитки токами к. з.; б — вследствие разветвления токов к. з.

При наличии подпитки сопротивление на зажимах реле оказывается большим, чем действительное сопротивление прямой последовательности до места к. з., что приводит к сокращению зоны торвых и третьих ступеней защиты. Чем больше ток подпитки I_{KN} , тем больше искажается (увеличивается) сопротивление z_p .

в) Влияние разветвления токов при сочетании одинарной линии с параллельными

При сочетании одинарной линии с двумя параллельными (рис. 11-35, б) линиями реле, установленное на одинарной линии, замеряет преуменьшенное сопротивление при к. з. на одной из параллельных линий. В этом случае

$$U_p = [I_{1к} z'_{1л} + (I_{1к} - I'_{1к}) z'_{1к}]; \quad I_p = I_{1к}.$$

Следовательно,

$$z_p = z'_{1л} + \frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} z'_{1к} = z'_{1л} + k_p z'_{1к}, \quad (11-44)$$

где k_p — коэффициент разветвления токов:

$$k_p = \frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} < 1.$$

Влияние подпитки и разветвлений должно учитываться при расчете уставок дистанционных защит.

¹ В расчетах для учета подпитки часто пользуются коэффициентом токораспределения $k_T = \frac{I_{KM}}{I_K}$, тогда $z_p = z'_{1л} + \frac{z'_{1к}}{k_T}$.

г) Влияние погрешности измерительных трансформаторов

Погрешность трансформаторов тока уменьшает вторичный ток по сравнению с его расчетным значением, что вызывает сокращение зон действия защиты. Угловая погрешность искажает величину угла φ_p сопротивления z_p и влияет таким образом на работу направленных реле сопротивления, у которых $z_{с.р} = f(\varphi_p)$. Для ограничения искажений в работе измерительных органов трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, должны проверяться по кривым предельной кратности, которым соответствует полная погрешность, не превышающая 10%, и удовлетворять им при максимальном значении тока к. з. в конце первой зоны.

Погрешность трансформаторов напряжения по коэффициенту трансформации велика. Однако величина вторичного напряжения может заметно искажаться за счет падения напряжения в соединительных проводах, связывающих реле с трансформатором напряжения. Подбором сечения соединительных проводов эти искажения сводятся к минимальному значению. Угловая погрешность трансформаторов напряжения влияет на работу реле так же, как и трансформаторов тока.

11-12. ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

а) Функции и типы пусковых реле и требования к ним

В односистемных дистанционных защитах и в защитах с одним комплектом дистанционных (измерительных) органов на две зоны необходимы пусковые органы, подготавливающие схему к правильной работе при к. з. Пусковые органы в этих защитах выполняют следующие функции:

1. Пускают реле времени второй, третьей и, если есть, четвертой зон.

2. В схемах с одним комплектом измерительных органов для первой и второй зон, автоматически изменяют сопротивление срабатывания измерительных органов с первой зоны на вторую (см. § 11-10, б).

3. В односистемных схемах подводят при к. з. к измерительным органам токи и напряжения поврежденных фаз (см. § 11-10, а).

4. Действуют в качестве резервной зоны защиты.

В трехсистемных защитах с самостоятельными комплектами измерительных органов для каждой зоны, выполненных с помощью направленных реле сопротивления, специальных пусковых органов не требуется.

В этих схемах никаких переключений в цепях измерительных органов не производится. Измерительные органы отстроены от нагрузки. Пуск реле времени осуществляется измерительными

органами соответствующей зоны. В качестве резервной (третьей) зоны служит дополнительный комплект измерительных органов.

В защитах, использующих для определения зоны реле реактивного сопротивления (такие защиты широко применялись раньше в СССР), самостоятельный пусковой орган является обязательным. Реле реактивного сопротивления реагируют на нагрузку и поэтому нуждаются в органе, разрешающем их работу только при к. з.

Пусковые органы должны удовлетворять трем основным требованиям. Они должны обладать достаточной чувствительностью при к. з., иметь надежную отстройку от максимальной нагрузки и по возможности не действовать при качаниях. Выполнение этих требований является трудной в техническом отношении задачей.

В качестве пусковых реле дистанционной защиты применяются главным образом токовые реле и реле сопротивления. Оба типа пусковых реле должны быть отстроены от нагрузки, что ограничивает чувствительность защиты при к. з., особенно на длинных и сильно загруженных линиях. В связи с этим нашли применение реле сопротивления со смещенной круговой, эллиптической и овальной характеристиками, а также особые блокирующие реле (называемые иногда «шорами» или фазоограничителями) и реле с характеристикой в виде четырехугольника. Блокирующие реле применяются в сочетании с пусковыми реле и позволяют ограничить их действие при перегрузках, что дает возможность повысить чувствительность защиты при к. з. Токовые реле и реле сопротивления реагируют на качания и не полностью отвечают требованиям к пусковым реле. Поэтому защиты с подобными пусковыми реле дополняются блокировками от качаний.

Наиболее рациональной характеристикой пускового реле сопротивления является характеристика, показанная на рис. 11-7, *е* в виде заштрихованного четырехугольника $OABC$, обеспечивающая надежное действие защиты с учетом сопротивления дуги в пределах выбранной зоны действия (участок линии OA). Для обеспечения надежного действия при к. з. характеристика срабатывания реле должна охватывать заштрихованную площадь $OKK'K''$ (на рис. 11-6, *д*).

При такой характеристике реле не действует при $z_p > z_{к.з.}$ и поэтому возможность ложной работы защиты при перегрузках и качаниях сводится к минимуму.

б) Токовые пусковые реле

Токовые пусковые реле, включенные на фазные токи. Токовые реле при большой кратности токов к. з. обладают четкой избирательностью как при двухфазных, так и однофазных повреждениях, потому что в обоих случаях они действуют только на тех фазах, где протекает ток к. з.

В защитах от междуфазных к. з. пусковые токовые реле достаточно устанавливать на двух фазах, что позволяет обеспечить их действие при всех видах междуфазных повреждений и необходимую избирательность в односистемных и двухсистемных схемах дистанционных защит.

Главный недостаток токового пуска состоит в том, что он реагирует на токи нагрузки и качаний так же, как и на к. з.

Ток срабатывания пусковых реле приходится отстраивать от тока максимальной нагрузки. Поэтому в сетях 110 кВ и выше и особенно на длинных электропередачах с большой нагрузкой токовый пуск оказывается недостаточно чувствительным.

Токовые пусковые реле проще остальных пусковых устройств, поэтому их следует применять во всех случаях, когда они обеспечивают надежную чувствительность и отстройку от максимальной нагрузки. Наибольшее применение токовый пуск находит в дистанционных защитах сети 35 кВ.

Токовые реле обратной последовательности. В некоторых схемах дистанционных защит в качестве пускового органа применяется токовое реле, включенное через фильтр обратной последовательности.

Двухфазные к. з. сопровождаются появлением тока обратной последовательности, и реле надежно действует. При трехфазных к. з. $I_2 = 0$, но практически все трехфазные к. з. возникают как однофазные или двухфазные повреждения, переходящие затем в трехфазные. Поэтому чтобы обеспечить пуск защиты от реле обратной последовательности при трехфазных к. з., предусматривается особая схема, **ф и к с и р у ю щ а я** (запоминающая) кратковременное или длительное появление I_2 в первый момент возникновения повреждения. Эта схема рассмотрена в § 13-4 (рис. 13-4 и 13-5).

П р е и м у щ е с т в о м пуска I_2 является недействие его при симметричных перегрузках и качаниях, а также высокая чувствительность при к. з., поскольку $I_{с.р}$ реле обратной последовательности отстраивается только от $I_{нб}$ фильтра, имеющего небольшую величину. **Н е д о с т а т к о м** реле I_2 является действие при качаниях и нагрузке, если они сопровождаются появлением несимметрии (I_2 и U_2).

в) Пусковые реле сопротивления

Схемы включения. Схемы включения реле на ток и напряжение сети должны обеспечивать: надежный пуск защиты при к. з. на защищаемой линии и резервируемом участке сети, наилучшую избирательность поврежденных фаз и стабильность зоны действия. Исходя из этих требований, пусковые реле сопротивления — не-направленные и направленные, с круговыми и эллиптическими характеристиками включаются на междуфазные напряжения и

разность одноименных фаз токов согласно табл. 11-1 или на междофазные напряжения и ток одной фазы по табл. 11-2.

Первая схема (табл. 11-1) обеспечивает стабильность зоны действия при всех видах к. з. (см. § 11-19, б), что очень важно, когда пусковые реле выполняют функции дистанционного органа третьей зоны защиты. Однако эта схема не обеспечивает избирательности поврежденных фаз. При двухфазных к. з. (рис. 11-36, а) все три реле питаются током к. з. и имеют пониженное напряжение, поэтому при близких к. з. они могут сработать все одновременно, что не позволяет выявлять поврежденные фазы по действию пусковых реле.

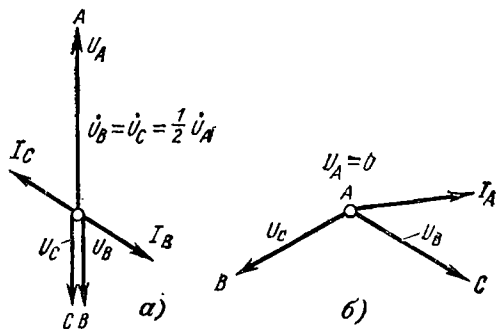


Рис. 11-36. Векторные диаграммы при к. з. а — двухфазном; б — однофазном.

С учетом этого первая схема включения должна применяться как лучшая с точки зрения стабильности зон во всех дистанционных защитах, не требующих избирательного пуска.

Вторая схема (см. § 11-19, б, табл. 11-2) не обеспечивает стабильности зоны действия реле при разных видах к. з., но позволяет с некоторыми дополнениями обеспечить избирательность и поэтому применяется в тех защитах, где это свойство необходимо (например, в односистемных схемах).

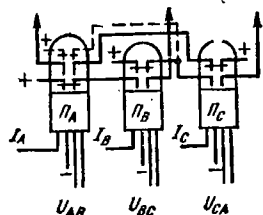


Рис. 11-37. Схема взаимной циклической блокировки пусковых реле сопротивления.

Сама схема включения не дает достаточно четкой избирательности при двухфазных к. з. Так, например (рис. 11-36), при к. з. на фазах В и С должно работать реле, включенное на напряжение U_{BC} и ток I_B . Однако при близких к. з. может также подействовать и реле, включенное на U_{CA} и I_C , поскольку $U_{CA} = 1,5U_{\phi}$ (рис. 11-36, а), т. е. меньше нормального, равного $1,73U_{\phi}$, а ток $I_C = I_{к.з}$. Для обеспечения четкой избирательности может вводиться взаимная блокировка между пусковыми реле (рис. 11-37).

Контакты пусковых реле соединяются попарно, например Π_A и Π_B , Π_B и Π_C , Π_C и Π_A , как показано на рис. 11-37. При такой схеме в случае двухфазного к. з. цепь пуска создается только одним реле, включенным на напряжение петли к. з. Так, при к. з. между фазами В и С сработает реле Π_B , включенное на U_{BC} и ток I_B , и заблокирует действие реле Π_C , которое питается током к. з., протекающим по фазе С, не позволяя ему сработать.

все четыре квадранта комплексной плоскости. Реле действует во время качаний при всех значениях $z_{p. \text{ кач}} < z_{c. p}$ независимо от угла φ_p .

Так как на длинных линиях пусковые реле имеют относительно большие сопротивления $z_{c. p}$, то реле на этих линиях оказываются очень восприимчивыми к качаниям. Таким образом, можно сделать вывод, что *ненаправленные реле не могут служить для защиты длинных и сильно нагруженных линий как по условиям чувствительности при к. з., так и по условиям отстройки от качаний.*

Ненаправленные реле применяются в качестве пусковых органов в сетях 35 кВ и на недлинных и мало нагруженных линиях в сети 110 кВ.

По сравнению с токовыми пусковыми реле ненаправленное реле сопротивления отличается большей чувствительностью к к. з., так как оно реагирует не только на увеличение тока, но и на снижение напряжения.

Пусковые направленные реле сопротивления с круговой характеристикой. Характеристика 2 направленного реле (рис. 11-38) значительно лучше удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пусковым реле, чем ненаправленное реле с характеристикой 1. Это объясняется тем, что величина $z_{c. p}$ направленного реле зависит от угла φ_p , а рабочая зона характеристики относительно невелика и расположена в основном в первом квадранте комплексной плоскости. Благодаря этому реле обладает при к. з. большей чувствительностью, чем при нагрузке, и в меньшей степени реагирует на качания.

Действительно, при металлических к. з. угол φ_p сопротивления на зажимах реле $z_{p. k}$ равен углу сопротивления линии и составляет $65-80^\circ$, т. е. близок к $\varphi_{m. ч}$ реле. Поэтому при к. з. реле работает с наибольшей чувствительностью и зоной действия $z_{c. p} = z_{c. p. \text{ макс}}$ (вектор AC).

В режиме нагрузки с передачей большой активной мощности по защищаемой линии угол сопротивления $z_{\text{раб. мин}}^*$ меньше, чем при к. з., он колеблется в пределах $10-40^\circ$. При этих углах $z_{c. p}$ реле уменьшается на 20—50% по отношению к $z_{c. p. \text{ макс}}$, что следует из чертежа и уравнения срабатывания реле

$$z_{c. p} = z_{c. p. \text{ макс}} \cos(\varphi_{m. ч} - \varphi_p).$$

Такое загрузление реле при $\varphi_p = \varphi_{\text{нагр}}$ позволяет допускать большие нагрузки на линии по сравнению с ненаправленным реле. Это наглядно показано на рис. 11-38, где совмещены характеристики направленного и ненаправленного реле сопротивления 1 и 2, обладающие одинаковой чувствительностью при к. з. (вектор AC).

При качаниях направленное реле сопротивления может действовать, только когда вектор $z_p = z_{\text{кач}}$ попадает в рабочую зону реле, которая в основном ограничена первым квадрантом. Если $z_{\text{кач}}$ находится за пределами первого квадранта, то работа

реле невозможна. Таким образом, направленное реле отстроено от качаний значительно лучше, чем ненаправленное.

Недостатком направленного реле является мертвая зона по напряжению, так как реле не работает при $U_p = 0$ или значениях, близких к нему. Этот недостаток при двухфазных к. з. устраняется применением подпитки реле напряжением третьей фазы.

Для устранения мертвой зоны при трехфазных к. з. устанавливается токовая отсечка или производится смещение характеристики реле в сторону третьего квадранта, последнее допустимо, поскольку третья зона защиты работает с выдержкой времени.

Для устранения мертвой зоны можно применять небольшое смещение характеристики относительно начала координат вдоль оси максимальной чувствительности AC , в сторону III квадранта.

При к. з. через сопротивление дуги r_d направленное реле допускает меньшее сопротивление, чем ненаправленное, что видно

из рис. 11-38 ($r_d'' < r_d'$). Однако, как показывает опыт, чувствительность направленных реле оказывается достаточной для безотказного отключения повреждений с переходным сопротивлением.

Направленные реле с круговой характеристикой получили широкое применение в качестве пусковых органов в сетях 110—220—330—500 кВ. Их применение особенно целесообразно на длинных и сильно загруженных линиях электропередачи.

Пусковые направленные реле с эллиптической характеристикой. Характеристика реле 1 показана на рис. 11-39,

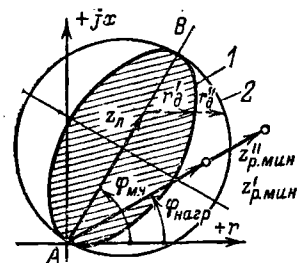


Рис. 11-39. Эллиптическая характеристика срабатывания и ее сравнение с круговой.

с ней совмещена для сравнения характеристика 2 направленного реле, имеющая вид окружности.

Обе характеристики имеют одинаковую зону действия (отрезок AB) при к. з. с углом $\varphi_p = \varphi_{м.ч.}$

Но при $\varphi_p \neq \varphi_{м.ч.}$ реле с эллиптической характеристикой имеют меньшую область действия, чем реле с круговой характеристикой. Поэтому они несколько лучше отстраиваются от нагрузки и имеют меньшую возможность срабатывания при качаниях.

Реле с эллиптической характеристикой допускают значительно меньшее переходное сопротивление r_d в месте к. з., чем реле с круговой характеристикой. Это является недостатком эллиптической характеристики, который нужно учитывать при выборе малой оси эллипса. Реле имеет мертвую зону при двухфазных и трехфазных к. з., которая устраняется так же, как и у реле с круговой характеристикой.

г) Реле сопротивления с блокировкой, ограничивающей действие защиты при перегрузке

Еще большее улучшение характеристики пускового реле можно получить, применив комбинированный пуск, состоящий из направленного реле сопротивления и блокирующего реле сопротивления смешанного типа (рис. 11-40, а). Характеристика 2 реле смешанного типа выражается уравнением

$$z_{c.p} = \frac{k}{\cos(\varphi_p - \delta)}$$

и представляет собой прямую линию под углом $90^\circ + \delta$ к оси r . Величина k в уравнении реле является проекцией векторов $z_{c.p}$ на

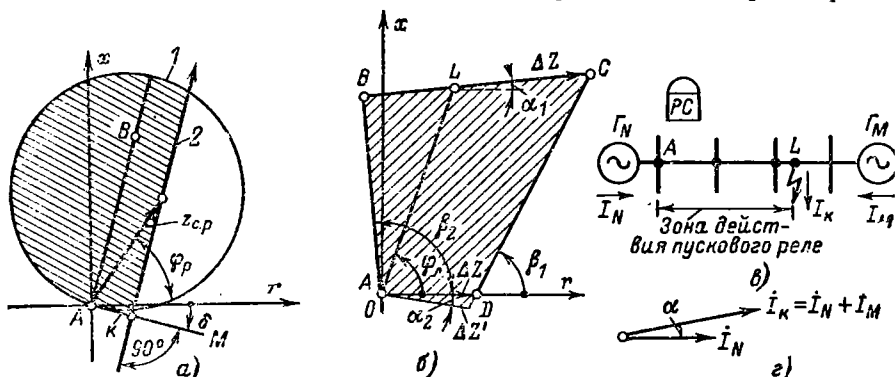


Рис. 11-40. Характеристика комбинированного пускового органа, состоящего из направленного реле сопротивления 1 и блокирующего реле сопротивления 2.

перпендикуляр AM и имеет постоянное значение. На рис. 11-40, а зона действия этого реле заштрихована. Блокирующее реле отсекает часть характеристики 1 реле сопротивления, ненужную для работы защиты при к. з. Благодаря этому вероятность неправильной работы при качаниях и перегрузке сводится к минимуму.

Сочетанием направленного реле сопротивления и двух блокирующих реле, отсекающих правую и левую части характеристики 1, можно достигнуть дальнейшего улучшения характеристики пускового устройства.

В качестве блокирующего реле можно использовать обычные реле мощности с углом внутреннего сдвига 60° и 30° .

Пусковое реле с характеристикой в виде четырехугольника. Характеристика реле показана на рис. 11-40, б. Площадь четырехугольника $ABCD$ должна быть минимальной, но обеспечивающей работу реле в пределах выбранной зоны действия. Исходя из этого, характеристика реле должна удовлетворять следующим условиям:

Для обеспечения направленности действия точка A характеристики должна совпадать с началом координат — точкой O .

Прямая BC должна проходить через точку L , соответствующей концу расчетной зоны действия реле (рис. 11-40, а).

Прямая AL представляет характеристику сопротивления защищаемой линии и образует с осью r угол φ_L , равный углу полного сопротивления линии z_L . Точка C выбирается из условия действия реле при к. з. в конце защищаемой зоны (т. е. в точке L) при наличии переходного сопротивления r_d в месте повреждения. Как указывалось в § 11-11, а,

$$z_{AC} = z_{AL} + \frac{I_K}{I_N} r_d = z_{AL} + \Delta z. \quad (11-44a)$$

С учетом угла α , сдвига фаз между векторами $\dot{I}_K = \dot{I}_N + \dot{I}_M$ и $\dot{I}_N$ прямая BC должна проходить относительно оси r под углом $\alpha_1 = \alpha + \alpha_{\text{зап}}$, где $\alpha_{\text{зап}}$ — угол запаса, учитывающий угловую погрешность измерительных трансформаторов и погрешность в срабатывании реле. Сторона CD должна быть смещена относительно отрезка AL на величину Δz , характеризующую дополнительное сопротивление, обусловленное электрической дугой r_d . При приближении места к. з. к точке A ток I_K возрастает, в результате этого r_d и Δz будут уменьшаться. С учетом этого угол β_1 принимается меньше угла защищаемой линии φ_L . Сторона AD по величине должна равняться $\Delta z'$, которое определяется сопротивлением r_d электрической дуги при к. з. в начале линии (точка A), и должна иметь угол $\alpha_2 = \alpha + \alpha_{\text{зап}}$. Сторона AB располагается под углом $\beta_2 > \varphi_L$ с таким расчетом, чтобы реле надежно действовало при металлических к. з. на защищаемом участке линии (прямая AL) с учетом погрешности измерительных трансформаторов и реле. Полученная характеристика реле $ABCD$ обеспечивает необходимую чувствительность при к. з. и имеет наилучшую отстройку от нагрузки и качаний по сравнению с другими характеристиками, обладающими равной чувствительностью при к. з. Реле с рассмотренной характеристикой могут быть получены с помощью двух реле: одного — с характеристикой BAD и другого — с BCD , или одного реле на полупроводниковых элементах. Для устранения мертвой зоны и улучшения резервирования при к. з. на длинных электропередачах можно применять смещение характеристики относительно начала координат.

11-13. СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

а) Классификация схем

Схемы дистанционных защит можно классифицировать по их назначению, типам дистанционных органов и принципам построения. По назначению схемы подразделяются на схемы защит от междуфазных к. з., от замыканий на землю и от всех видов повреждений. По типу дистанционных органов в различаются схемы с дистанционными реле полного и реак-

тивного сопротивления. По виду характеристики схемы подразделяются на двухступенчатые и трехступенчатые, и, наконец, по способам построения схемы можно разделить в зависимости от числа дистанционных органов в каждой зоне защиты на три группы: трехсистемные (с тремя дистанционными органами на зону), двухсистемные (с двумя дистанционными органами) и односистемные (с одним дистанционным органом на зону).

В Советском Союзе применяются главным образом схемы с дистанционными органами, реагирующими на полное сопротивление z_p и его угловой сдвиг φ_p , в качестве защиты от междуфазных к. з. Дистанционные защиты от замыканий на землю в СССР не применяются, поскольку от этого вида повреждения в сети 110 кВ и выше успешно используются более простые токовые направленные защиты нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой.

Реактансные защиты вследствие сложности их схем и отсутствия существенных преимуществ распространения в СССР не получили.

б) Общие принципы выполнения схем дистанционных защит

Дистанционная защита может применяться в качестве основной защиты или резервной. В первом случае она должна выполняться трехступенчатой, обеспечивая посредством первой и второй зоны защиту линии с минимальными выдержками времени и с помощью третьей зоны — резервирование защиты следующего участка. Во втором случае защита выполняется трехступенчатой, если резервная защита должна дублировать основную защиту, и по упрощенному варианту с двумя или одной ступенью, если ее задача сводится к резервированию защиты следующего участка и основной защиты своей линии без соблюдения требования быстродействия.

В качестве дистанционных (измерительных) органов в современных схемах защит используются главным образом направленные реле с характеристикой в виде окружности или эллипса, проходящих через начало координат или смещенных относительно него в III и I квадранты.

Перспективными являются реле с характеристикой в виде четырехугольника, изображенной на рис. 11-7, е. Как было показано в § 11-12, эти характеристики обеспечивают наибольшую чувствительность при к. з. и лучшую отстройку от токов нагрузки и качаний.

Ненаправленные дистанционные органы с круговой характеристикой в сочетании с органами направления мощности применяются в односистемных схемах для защиты сетей 35 кВ. В целях упрощения для первой и второй зон, как правило, используется один комплект дистанционных органов с переключением уставки с первой на вторую зону (см. § 11-10, б).

В схемах дистанционных защит, установленных на участках сети, где возможны качания, при которых защита может сработать неправильно, предусматривается специальное блокирующее устройство (см. § 13-2), исключающее действие защиты в этом режиме.

Все реле сопротивления могут неправильно работать при исчезновении напряжения, вызванном неисправностями во вторичных цепях трансформаторов напряжения. Поэтому в схемах предусматривается блокировка (см. § 6-4), снимающая оперативный ток с защиты в случае неисправности в цепях напряжения. При токовых пусковых органах блокировка не ставится, поскольку токовые пусковые органы не позволяют работать защите в нормальном режиме. В этом случае достаточно иметь сигнал об исчезновении напряжения в цепях защиты.

В Советском Союзе распространены трехсистемные и односистемные схемы. Трехсистемные защиты отличаются от односистемных большей простотой и четкостью схемы, большей надежностью и быстротой действия вследствие отсутствия в них переключений в цепях тока и напряжения.

Трехсистемные схемы. В качестве примера, иллюстрирующего принцип выполнения трехсистемных защит, на рис. 11-41 приведена схема двухступенчатой дистанционной защиты, не предназначенная для резервирования следующего участка сети. Схема имеет три направленных измерительных органа первой зоны PC_1 и три таких же органа второй зоны PC_2 .

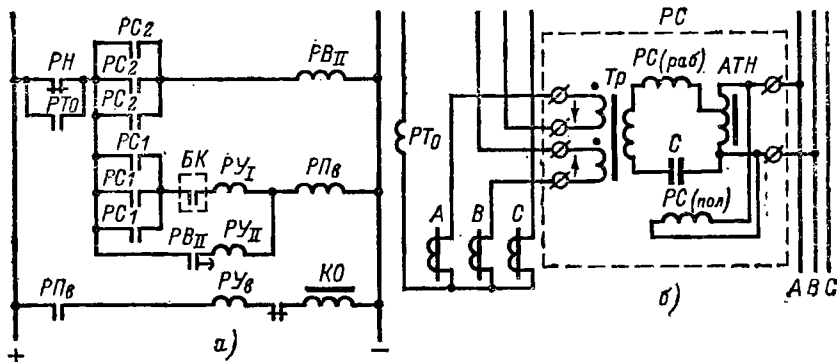


Рис. 11-41. Трехсистемная двухступенчатая дистанционная защита.

а — схема оперативных цепей; б — схема цепей переменного тока одного реле.

Измерительные органы жестко включены на междуфазные напряжения и разность токов соответствующих фаз.

Поскольку защита выполняется без третьей зоны, а ее дистанционные реле обладают направленностью, отстроены от нагрузки и не требуют никаких переключений в своих цепях, пусковые реле и реле направления мощности становятся излишними, поэтому эти органы в рассматриваемой схеме отсутствуют. Схема оперативных цепей защиты (рис. 11-41, а) очень проста. При к. з. в пределах первой зоны дистанционные реле PC_1 соответствующих фаз приходят в действие и замыкают цепь выходного промежуточного реле $РП_В$, последнее срабатывает, подавая импульс на отключение выключателя.

При к. з. во второй зоне действуют дистанционные органы PC_2 , пуская реле времени $PВ_{II}$. По истечении установленной на нем выдержки времени контакты $PВ_{II}$ замыкаются и замыкают цепь реле $РП_В$. При действии защиты выпадают флажки соответствующих указательных реле: $РУ_I$ или $РУ_{II}$ и $РУ_А$.

Во избежание неправильного действия защиты при обрыве в цепях напряжения, питающих реле PC , в схеме предусмотрена блокировка при помощи реле $РН$. При повреждении в цепях напряжения реле $РН$ выводит защиту из действия, снимаемая с нее плюс. Реле $РН$ реагирует и на к. з. с землей в первичной сети; чтобы сохранить защиту в действии при подобных повреждениях, установлено реле PT_0 , питающееся током нулевой последовательности. При замыканиях на землю реле PT_0 шунтирует контакты реле $РН$, сохраняя, таким образом, плюс на защите (см. гл. 6).

Блокировка защиты при качаниях осуществляется контактами $БК$, замыкающимися только при к. з. Схема цепей переменного тока защиты приведена на рис. 11-41, 6. На схеме показан один дистанционный орган типа КРС-131, включенный на $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$ и $\dot{I}_p = \dot{I}_A - \dot{I}_B$; остальные включаются аналогично.

В [Л. 81] рассмотрена защита ПЗ-2, предназначенная для сетей 110—330 кВ. Защита состоит из двухступенчатой защиты ДЗ-2, к которой добавлена третья ступень, обеспечивающая резервирование следующих участков сети. Третья зона выполняется с помощью трех направленных реле сопротивления КРС-1. Защита имеет три направленных дистанционных органа, построенных на схемах сравнения на выпрямленном токе.

Двухсистемные схемы (рис. 11-42). В Советском Союзе была разработана и широко применялась двухсистемная схема дистанционной защиты типа ПЗ-158 и ПЗ-159. В этой схеме один дистанционный орган $PC^{(3)}$ (КРС-131) служил для определения удаленности к. з. при трехфазных к. з. и второй $PC^{(2)}$ типа КРС-121 — для действия при двухфазных к. з. Цени тока и напряжения подводились к обоим реле жестко без переключений.

В качестве пусковых реле $ПО$ и дистанционного органа третьей зоны использовались направленные реле сопротивления КРС-131. Защита имела блокировку от качаний и блокировку от исчезновения напряжения. Упрощенная схема защиты приведена на рис. 11-42.

Односистемные защиты. Завод ЧЭАЗ выпускает односистемную защиту типа ПЗ-1 с реле мощности и сопротивления на выпрямленных токах. Защита предназначена для сети 35 кВ. Она имеет токовые пусковые реле, один дистанционный орган, выполненный по схеме сравнения, на выпрямленном токе и орган направления мощности на кольцевой фазочувствительной схеме. Ток и напряжение к дистанционному органу и органу направления мощности подводятся с помощью промежуточных реле, управляемых токовыми пусковыми реле защиты. Защита имеет три ступени времени.

Схема защиты подробно рассматривается в [Л. 81 и 97].

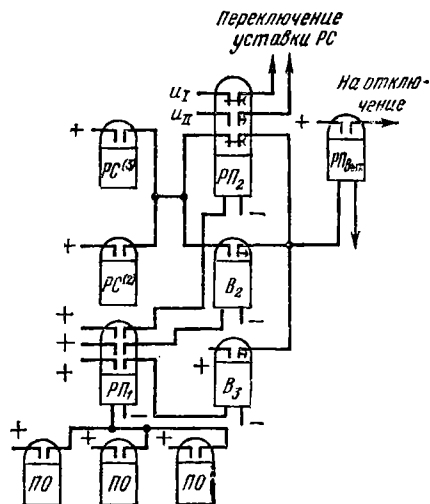


Рис. 11-42. Упрощенная схема двухсистемной защиты типа ПЗ-158. Блокировки от качаний и исчезновения напряжения не показаны.

а) Бесконтактные схемы на статических элементах

Любая защита состоит из реагирующих (измерительных) органов *ИО* и логической части *ЛЧ*, на выходе которой устанавливается выходное реле $P_{\text{вых}}$, посылающее команду на отключение выключателя (рис. 11-43).

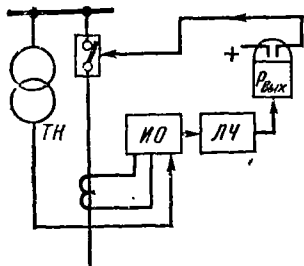


Рис. 11-43. Структурная схема релейной защиты.

В защитах на полупроводниковых элементах с помощью последних выполняются как измерительные органы, так и логическая часть, в результате чего схема защиты получается **бесконтактной**.

Бесконтактные схемы, выполненные на надежных элементах, обладают большей надежностью и требуют меньшего ухода, чем многоконтактные схемы с электромеханическими реле. Этими принципиальными преимуществами бесконтактных схем объясняется имеющаяся тенденция к их внедрению в релейной защите.

В бесконтактных схемах применяются единичные контактные реле в качестве выходных реле $P_{\text{вых}}$ защиты и т. д. В последнее время для этой цели пытаются использовать как более надежные и малогабаритные герметичные, магнитоуправляемые, безъякорные реле (**герконы**) [Л. 108].

Устройство основных реагирующих органов на полупроводниках (реле тока, мощности, сопротивления) было разобрано выше. Теперь кратко рассмотрим общие вопросы по выполнению логической части схем с помощью полупроводниковых элементов.

б) Логические элементы и выполняемые ими операции

Логическая часть защиты воспринимает сигналы основных органов, реагирующих на состояние сети, и по определенной предусмотренной схемой программе в зависимости от характера и сочетания поступивших сигналов производит операции, обеспечивая действие или недействие защиты.

Логическую часть сложных защит можно подразделить на несколько составных элементов, выполняющих отдельные простейшие операции. На вход такого простейшего логического элемента *ЛЭ*, условно изображенного на рис. 11-44, подаются сигналы, которые при определенном сочетании вызывают появление выходного сигнала. Под сигналами в бесконтактных схемах на полу-

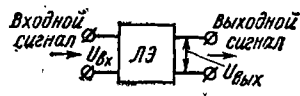


Рис. 11-44. Логический элемент.

проводниках подразумевается появление или изменение напряжения на зажимах логических элементов. Если логический элемент не работает, то напряжение на его выходе $U_{\text{вых}}$ равно нулю или меньше заданного значения $U_{\text{с.р.}}$. При действии элемента $U_{\text{вых}} \neq 0$ или больше $U_{\text{с.р.}}$. Обычно каждый сигнал обозначается определенной буквой и ему приписываются два условных цифровых значения: 0 и 1. Нуль означает отсутствие сигнала, а единица — его появление.

Такое обозначение используется для условной записи логических функций, характеризующих зависимость выходного сигнала от входных [Л. 82—87]. Для облегчения проектирования разработана теория проектирования и анализа сложных логических схем, основанная на использовании математических дисциплин, в частности алгебры логики [Л.105].

Логические схемы релейной защиты относительно просты и пока не требовали применения подобных методов анализа. Однако наименование основных логических операций и формы их записи были заимствованы из алгебры логики и стали применяться при рассмотрении бесконтактных схем защиты.

В схемах релейной защиты используются в основном три простейших логических операции, условно названные (как и в алгебре логики) ИЛИ, И, НЕ. Каждая из этих операций может выполняться с помощью контактных и бесконтактных элементов.

Схема, осуществляющая операцию ИЛИ, показана на рис. 11-45. Сигналы на входе обозначены A , B и C , а выходной сигнал — буквой X . Сигнал X на выходе схемы ИЛИ возникает при появлении хотя бы одного входного сигнала: или A , или B , или C .

На рис. 11-45, б приведена контактная схема, выполняющая операцию ИЛИ. Контакты электромеханических реле A , B и C соединяются в этом случае параллельно. При срабатывании любого из них появляется выходной сигнал, поступающий на следующий элемент схемы. В защите эта операция очень распространена. Например, по схеме ИЛИ выполняется пуск любой защиты (рис. 11-45, б). В этом случае реле A , B , C — пусковые.

Бесконтактная схема ИЛИ применяется в аналогичных случаях и может выполняться с помощью активных сопротивлений, диодов или триодов. Схема ИЛИ на активных сопротивлениях r показана на рис. 11-45, в. При отсутствии напряжения $U_{\text{вх}}$, или, иначе говоря, входных сигналов на зажимах A , B и C сопротивлений r , напряжение $U_X = 0$. Это означает, что выходного сигнала нет.

При подаче напряжения $U_{\text{вх}}$ хотя бы на один входной зажим A , или B , или C появляется напряжение $U_X = U_{\text{вх}} - Ir$, т. е. возникает выходной сигнал.

Схема с диодами (рис. 11-45, г) работает аналогично. При отсутствии входных сигналов выходной сигнал U_X также отсутствует. В случае появления положительного сигнала (напряжения) на одном из диодов A , или B , или C последний открывается и на его

выходе в точке X возникает положительный сигнал $U_X = U_{вх} - I r_d$, где I и r_d — ток и сопротивление открытого диода.

На рис. 11-45, б приведена схема **ИЛИ** на диодах, применяемая в тех случаях, когда в точке X нормально дежурит положительное напряжение $+E$. Подобные условия имеют место, если элемент **ИЛИ** подает сигнал на триод усилителя. При подаче отрицательного напряжения $U_{вх}$ на один из зажимов A , или B , или C соответствующий диод открывается и на выходе схемы (на зажиме X) появляется отрицательное напряжение $U_X = U_{вх} - I r_d$. Во всех рассмотренных схемах в сопротивлении элемента **ИЛИ** (r или r_d)

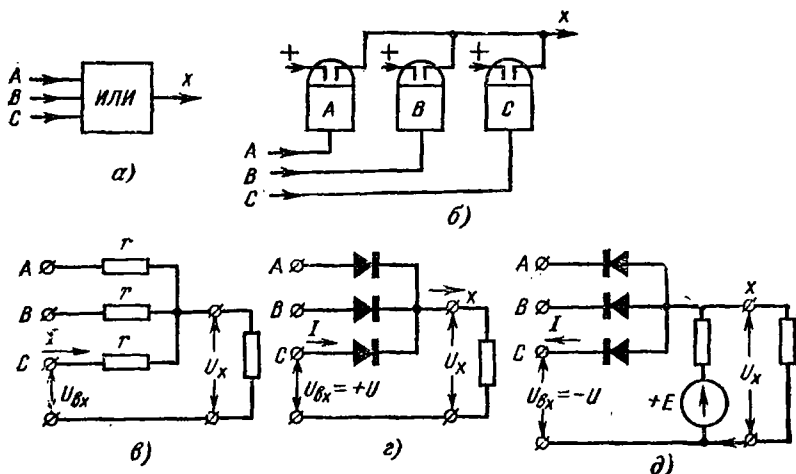


Рис. 11-45. Логическая схема **ИЛИ**.

а — условное изображение; б — контактная схема; в — на активных сопротивлениях; г и д — на полупроводниковых диодах

теряется часть энергии, подводимой к входу элемента. За счет этого мощность выходного сигнала получается меньше входного, происходит ослабление сигнала.

Схемы на триодах не рассматриваются, так как они применяются редко.

В алгебре логики операция **ИЛИ** называется также логической суммой и обозначается знаком «+» или $\vee$. Она записывается в общем виде уравнением: $A + B + C = X$, где «+» читается как **ИЛИ**. Условное изображение элемента **ИЛИ**, применяемое в структурных схемах, приведено на рис. 11-45, а.

Схемы, выполняющие операцию **И** (рис. 11-46). Сигнал X на выходе этой схемы возникает только при одновременном появлении сигналов на всех входах схемы (A и B на рис. 11-46). Подобная операция имеет место, например, в схеме максимальной направленной защиты, которая посылает импульс на реле времени, если сработает токовое реле и реле мощности, или в схеме дистан-

пной защиты, которая приходит в действие, если сработают пусковой орган защиты и дистанционный, и т. д.

В контактных схемах операция *И* выполняется последовательным соединением контактов реле *A* и *B* (рис. 11-46, б).

Схема *И* с двумя входными сигналами *A* и *B*, построенная на диодах, показана на рис. 11-46, в. Нормально сигналы *A* и *B* отсутствуют. При появлении сигнала *A* в виде положительного напряжения U_{cA} диод D_1 открывается и по сопротивлению R_1 , R_2 проходит ток.

Потенциал точки *X* равен падению напряжения на R_2 , его величина мала и недостаточна для приведения в действие элемента, подключенного к выходу схемы *X*.

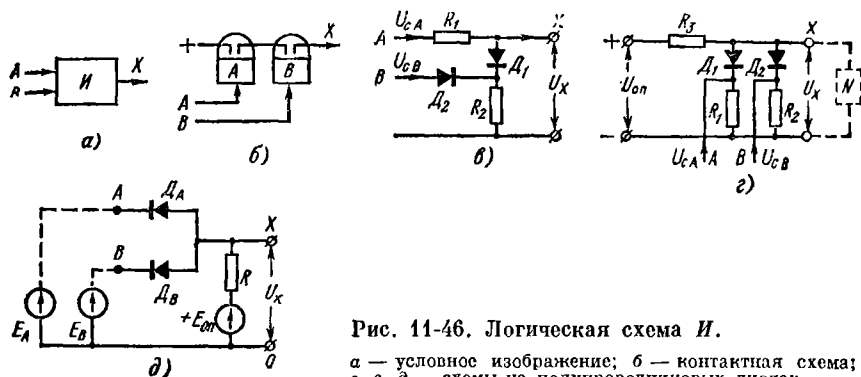


Рис. 11-46. Логическая схема *И*.

а — условное изображение; б — контактная схема; в, г, д — схемы на полупроводниковых диодах.

При появлении одного (положительного) сигнала *B* диод D_1 закрыт и не пропускает сигнал *B* в точку *X*. Если же сигналы *A* и *B* появятся одновременно, то сигнал *B* закроет диод D_1 , высокий положительный потенциал от сигнала *A* попадет в точку *X* и поступит на элемент, подключенный к выходу схемы.

Аналогично работает второй вариант схемы *И*, изображенной на рис. 11-46, г. При отсутствии сигналов *A* и *B* диоды D_1 и D_2 открыты. Выходное напряжение U_X равно падению напряжения в R_1 и R_2 , оно близко к нулю и недостаточно для действия элемента, подсоединенного к выходу схемы. При появлении одного из сигналов (*A* или *B*) напряжение U_X не меняется. Если же появятся два положительных сигнала *A* и *B* и величина каждого сигнала U_{cA} и $U_{cB} > U_{оп}$, то оба диода закроются и на выходе схемы появится напряжение $U_X = U_{оп}$, достаточное для действия элемента *N*.

В третьем варианте (рис. 11-46, д) напряжение U_X на выходе схемы (в точке *X*) появляется только при условии, что на все входные зажимы схемы *A* и *B* поданы напряжения положительного знака: E_A и $E_B > E_{оп}$. В этом случае диоды D_A и D_B заперты и $U_X = U_{оп}$. При появлении только одного сигнала, например

E_A , диод D_B , не имеющий сигнала, под действием $E_{оп}$ открыт и шунтирует выходные зажимы $X - 0$, поэтому напряжение $U_X = 0$ и выходной сигнал отсутствует.

Условное изображение схемы $И$ показано на рис. 11-46, a . В алгебре логики операция $И$ рассматривается как логическое умножение, обозначаемое знаком $\times$ или $\wedge$.

Условная запись этой операции имеет вид $A \times B = X$, где знак умножения $\times$ читается как $И$.

Схема, выполняющая операцию $НЕ$ или $НЕТ$ (рис. 11-47). При отсутствии входного сигнала A (рис. 11-47, a) на выходе схемы имеется сигнал X , при появлении входного сигнала A сигнал на выходе схемы исчезает. Сигнал X будет, если не будет сигнала A .

Примером операции $НЕ$ может служить схема блокировки защиты от исчезновения напряжения (рис. 11-47, $б$). Нормально через замкнутые контакты реле H на защиту подается плюс. В случае обрыва цепи напряжения (появляется сигнал A) реле H срабатывает, его контакты размыкаются и снимают плюс с защиты.

Аналогичная операция в бесконтактных схемах имеет много вариантов исполнения. На рис. 11-47, $в$ показана схема $НЕ$, выполняемая с помощью транзистора T . Нормально на базу T подано положительное смещение. Триод T закрыт. На выходе схемы X под-

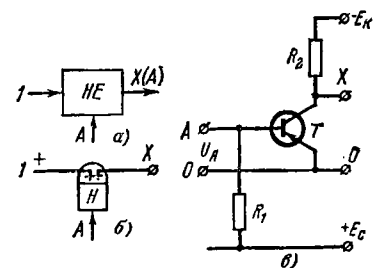


Рис. 11-47. Логическая схема $НЕ$.

a — условное изображение; $б$ — контактная схема; $в$ — схема на транзисторе.

держивается отрицательное напряжение, поступающее через R_2 . При подаче на вход схемы A отрицательного сигнала триод открывается и шунтирует выход схемы. Напряжение в точке X падает до нуля (если принять, что сопротивление открытого триода $R = 0$). Условное изображение схемы $НЕ$ показано на рис. 11-47.

В алгебре логики операция $НЕ$ называется л о г и ч е с к и м о т р и ц а н и е м или и н в е р с и е й и записывается в виде уравнения $X = \bar{A}$.

Элемент $НЕ$ преобразует поступающий на вход сигнал на обратный по величине и знаку. Например, если на входе, т. е. на базе триода, сигнал отсутствует и положительным смещением ($+E_c$) триод заперт, то напряжение на выходе триода эмиттер — коллектор отлично от нуля, а зажим X имеет о т р и ц а т е л ь н ы й знак. Если же на вход подан о т р и ц а т е л ь н ы й потенциал $U_A \geq E_c$, то триод открыт, напряжение эмиттер — коллектор равно нулю и зажим X имеет п о л о ж и т е л ь н ы й потенциал, т. е. о б р а т н ы й в х о д н о м у. Это свойство элемента $НЕ$, выполненного на триоде, называют и н в е р т и р о в а н и е м с и г -

на л а, а сам элемент *НЕ* — инвертором. Такое название нельзя считать точным, так как в электротехнике инвертором называют устройство, преобразующее постоянный ток в переменный.

в) Дополнительные функциональные элементы логических схем

Кроме основных логических элементов *ИЛИ*, *И*, *НЕ* имеются дополнительные элементы. В качестве дополнительных элементов логических схем применяются: усилители сигналов; элементы замедления на срабатывание и возврат (осуществляющие функции реле времени и промежуточных реле замедленного действия); релейные элементы, реагирующие на появление сигнала; элементы памяти.

Усилители служат для увеличения мощности выходных сигналов до значения, необходимого для надежного действия элементов схемы, реагирующих на этот сигнал. Усилители применяются на выходе схем сравнения измерительных органов для обеспечения надежной работы реагирующего элемента и на выходе логических схем (*ИЛИ* и *И*) в активных сопротивлениях, в которых, как указывалось выше, теряется значительная мощность входящих сигналов.

В логических схемах обычно используются однокаскадные усилители с нормально открытым или закрытым транзистором. Для усиления сигнала в измерительных органах в большинстве случаев применяются двух- и трехкаскадные усилители.

Однокаскадный усилитель с нормально закрытым транзистором T_1 показан на рис. 11-48, а. Транзистор T_1 включен по схеме с общим эмиттером¹, так как эта схема по сравнению со схемами с общей базой и общим коллектором (рис. 11-48, в и г) обеспечивает наибольший коэффициент усиления по мощности.

На входные зажимы 1 и 2 (база — эмиттер) подается положительное относительно эмиттера напряжение смещения $+E_c$ и управляющий сигнал $U_{вх}$, противоположный по отношению к E_c полярности (рис. 11-48, а). Результирующее напряжение база — эмиттер

$$U_{бэ} = E_c - U_{вх}. \quad (11-45)$$

Коллектор транзистора с проводимостью *p-n-p* должен получать отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал $-E_k$, напряжение между коллектором и эмиттером $U_{э.к}$ является выходным напряжением усилителя и, как видно из схемы, равно:

$$U_{э.к} = U_{вых} = E_k - I_k R_k. \quad (11-46)$$

При $U_{вх} = 0$ на базу подается положительное смещение E_c , запирающее триод. В этом случае ток коллектора, питающий на-

¹ В этой схеме эмиттер непосредственно связан с входным 2 и с выходным 4 зажимом триода, т. е. является общим элементом входа и выхода схемы. Потенциал общих выводов 2, 4 условно принимается равным нулю.

грузку, $I_K = 0$, а коллекторное напряжение $U_K = -E_K$ (при этом потенциал точки 3 имеет отрицательный знак).

При появлении входного сигнала $U_{вх} > E_c$ напряжение на базе (база — эмиттер) согласно (11-45) становится отрицательным, триод T_1 открывается, в нагрузке R_K появляется ток коллектора I_K , выходное напряжение согласно (11-46) уменьшается и в пределе при полном открытии триода становится равным нулю, если пре-

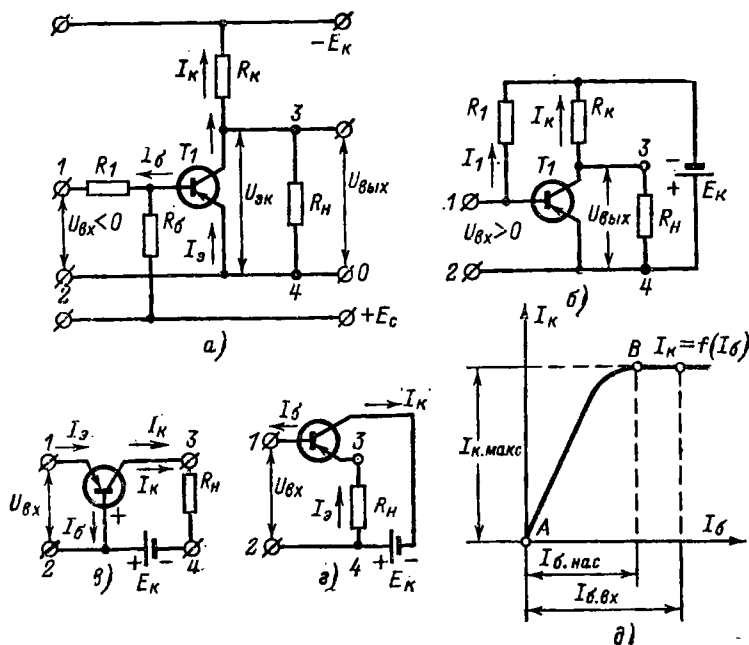


Рис. 11-48. Однокаскадный усилитель мощности.

а — с нормально открытым триодом типа p-n-p; б — с нормально закрытым триодом типа p-n-p; в — схема включения триода по схеме с общей базой; г — с общим коллектором; д — характеристика триода $I_K = f(I_B)$.

небрежь очень малым внутренним сопротивлением открытого триода. Величина коллекторного тока I_K будет меняться с изменением тока базы I_B (или напряжения базы U_b) (рис. 11-48, д).

Эта характеристика показывает, что при $I_B = I_{б.нас}$ ток I_K достигает максимального значения ($I_{K, макс} = E_K/R_K$) и при дальнейшем росте I_B не изменяется. Точке В соответствует (рис. 11-48, д) полное открытие триода. Этот режим называется режимом «насыщения».

Начальной точке А кривой $I_K = f(I_B)$ соответствует полное закрытие триода. Этот режим работы триода называется режимом «отсечки». В промежутке между точками А и В триод работает в режиме линейного усиления.

Усиление тока, осуществляемое усилителем, характеризуется коэффициентом усиления тока $\beta = I_k/I_b$. Величина β в зависимости от типа триода лежит в пределах от 10 до 100. Усиление по мощности определяется отношением выходной мощности $P_{\text{вых}} = I_k^2 R_{\text{вых}}$ к входной $P_{\text{вх}} = I_b^2 R_{\text{вх}}$ с учетом, что $I_k = \beta I_b$ получим коэффициент усиления по мощности:

$$k_M = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \beta^2 \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Различают два режима работы усилителя: режим **линейного усиления**, при котором триод работает на прямолинейном участке AB кривой $I_k = f(I_b)$, и **ключевой режим**, когда триод нормально закрыт, а при появлении входного сигнала $U_{\text{вх}}$, которому соответствует $I_b > I_{b, \text{нас}}$, скачком переходит в режим насыщения и полностью открывается (рис. 11-48, ∂).

В этом режиме триод работает как ключ или контактное реле, замыкающее и размыкающее цепь нагрузки (рис. 11-48, ϵ). Поэтому такой режим работы усилителя называется **ключевым** или **релейным**. В схемах релейной защиты усилители обычно работают в ключевом режиме. Параметры усилителя, работающего в ключевом режиме, подбираются так, чтобы при появлении входного сигнала $U_{\text{вх}}$ (рис. 11-48, ∂) триод полностью открывался и давал на выходе ток $I_{k, \text{макс}}$.

Усилитель с нормально открытым триодом показан на рис. 11-48, δ . Нормально при отсутствии входного сигнала ($U_{\text{вх}} = 0$) триод T_1 открыт отрицательным напряжением (током), поданным через сопротивление R_1 на базу триода. Сопротивление триода в этом режиме равно нулю, и поэтому нагрузка R_n , подключенная на выходные зажимы 2 и 4, зашунтирована.

При появлении положительного сигнала, достаточного для закрытия триода, последний закрывается, нагрузка дешунтируется и на ней появляется напряжение $U_{\text{вых}} = \frac{E_k R_n}{R_k + R_n}$ и ток $I_n = U_{\text{вых}}/R_n$.

Двухкаскадные усилители. Принцип выполнения и работа двухкаскадного усилителя были рассмотрены в § 2.

Триггер¹. В бесконтактных схемах релейной защиты находят применение двухкаскадные усилители с положительной обратной связью, работающие в релейном режиме. Такие схемы, называемые **триггерами**, переходят из состояния недействия ($U_{\text{вых}} = 0$) в состояние работы ($U_{\text{вых}} = U$) мгновенно (скачкообразно), если входное напряжение достигает определенного значения: $U_{\text{вх}} \geq U_{\text{с.р.}}$. При снижении $U_{\text{вх}}$ до $U_{\text{воз}}$ выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ мгновенно падает до нуля и схема возвращается в исходное состояние.

¹ Триггер — (trigger), английское слово, означающее в переводе спусковое устройство, курок (ружья); образно характеризует принцип действия схемы.

Такая схема работает как обычное электромеханическое реле. Наряду с подобными самовозвращающимися схемами, называемыми схемами с одним устойчивым состоянием, применяются триггерные схемы с двумя устойчивыми состояниями, действующие так же, как и предыдущая схема. Она мгновенно переходит в новое состояние при появлении $U_{вх} \geq U_{с.р.}$, но остается в новом положении как угодно долго, пока не появится новый сигнал, возвращающий ее в первоначальное состояние. Подобные схемы позволяют фиксировать появление сигнала, «запомнить» его.

Имеется и третья разновидность — это схема с одним устойчивым состоянием, возвращающаяся в начальное положение через определенное время $t_{воз}$. Такие схемы используются в качестве элемента с замедленным возвратом, фиксирующего на некоторое время появление сигнала.

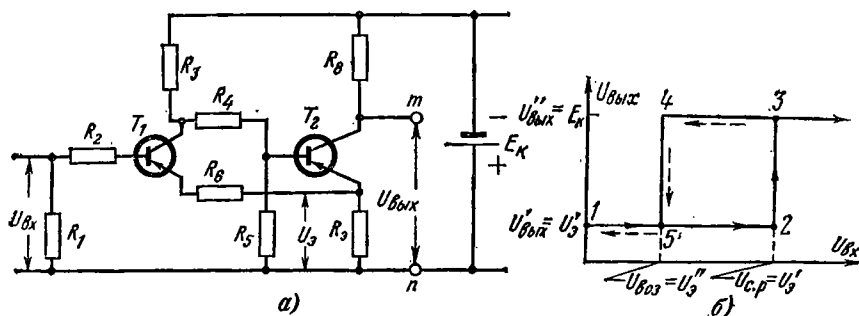


Рис. 11-49. Двухкаскадный усилитель, работающий в релейном режиме (триггер).

а — схема; б — диаграмма работы.

На рис. 11-49, а и б приведены схема и характеристика работы триггера с одним устойчивым состоянием и самовозвратом, выполняющего функции бесконтактного реле. Особенностью схемы является наличие обратной связи, осуществляемой с помощью сопротивления R_3 , через которое проходят эмиттерные токи $I_{э1}$ и $I_{э2}$ обоих триодов T_1 и T_2 .

Состояние схемы — не дей ст в и е, с р а б а т ы в а н и е, в о з в р а т — з а в и с я т, как уже было отмечено, от значения $U_{вх}$.

П р и $U_{вх} = 0$ триод T_1 закрыт, а T_2 под действием отрицательного потенциала, подаваемого на его базу через сопротивление R_3 , открыт. По сопротивлению R_3 протекает эмиттерный ток $I_{э2}$ открытого триода T_2 . Ток $I_{э2}$ создает падение напряжения на зажимах R_3 $U_3 = I_{э2} R_3 = U'_3$. Принимая внутреннее сопротивление открытого триода T_2 равным нулю, можно считать, что (рис. 11-49, а) и $U_{вых} = U_3$. Это напряжение мало и недостаточно для создания выходного сигнала, соответствующего срабатыванию схемы. Триг-

гер находится в состоянии не действия. Напряжение U_3 через сопротивления R_6 , R_1 и R_2 прикладывается между эмиттером и базой триода T_1 , запирая последний. Это состояние триггера характеризуется на диаграмме работы триггера точкой 1.

Для срабатывания триггера необходимо подать на его входные зажимы 1 и 2 напряжение $U_{вх} = U_{с.р}$ (точка 2 на рис. 11-49, б). Это напряжение должно быть противоположно по знаку и равно по величине или больше напряжения U'_3 , запирающего триод T_1 . В результате этого триод T_1 начинает открываться, его сопротивление уменьшается, при этом отрицательный потенциал, подаваемый через сопротивление R_3 на коллектор T_1 и на базу T_2 , начинает уменьшаться. Вследствие этого триод T_2 начинает закрываться, ток эмиттера $I_{э2}$ уменьшается, что влечет за собой уменьшение напряжения U_3 , определяющего смещение на базе T_1 . Это способствует открытию триода T_1 и закрытию триода T_2 из-за снижения отрицательного потенциала на базе последнего. Процесс протекает лавинообразно и завершается полным открытием T_1 и закрытием T_2 .

В результате закрытия T_2 $U_{вых}$ скачком увеличивается до E_k (точка 3 на рис. 11-49, б). Триггер сработал. Дальнейшее увеличение $U_{вх} > U_{с.р}$ не изменит $U_{вых}$, так как оно достигло своего предельного значения E_k . Теперь $U_3 = I_{э1} R_3 = U'_3$.

При уменьшении $U_{вх}$, подводимого к базе T_1 , до $U_{вх} > U'_3$ потенциал базы T_1 становится положительным и триод T_1 начинает закрываться. В результате этого потенциал на базе T_2 начинает уменьшаться, вызывая открытие T_2 . Как и в предыдущем случае, процесс нарастает лавинообразно, завершаясь закрытием T_1 и открытием T_2 . Выходное напряжение $U_{вых}$ скачкообразно падает от E_k до U'_3 , и схема возвращается в начальное состояние.

Лавинообразный процесс закрытия и открытия триодов происходит практически мгновенно, т. е. скачком, как это требуется от устройства, работающего в релейном режиме.

Характеристика триггера на рис. 11-49, б является типовой характеристикой бесконтактного реле. При увеличении входного напряжения от нуля до $U_{с.р} = U'_3$ выходное напряжение скачком изменяется от $U_{вых1}$ до предельного значения $U_{вых3} = E_k$ и реле срабатывает. Напряжение, при котором происходит скачкообразное увеличение выходного напряжения, называется **напряжением срабатывания** бесконтактного реле. При уменьшении входного напряжения от $U_{с.р}$ до $U_{воз} = U'_3$ выходное напряжение скачком падает от $U_{вых3}$ до $U_{вых1}$ (точка 5); это означает, что бесконтактное реле вернулось в начальное положение. Соответствующее этому входное напряжение U'_3 называется **напряжением возврата** бесконтактного реле.

г) Логические схемы на типовых элементах

По условию производства, конструирования и эксплуатации целесообразна типизация логических схем и выполнение их на унифицированных типовых элементах. В этом направлении ведутся разработки, в частности для промышленной автоматики предложена серия логических элементов [Л. 54, 82] системы

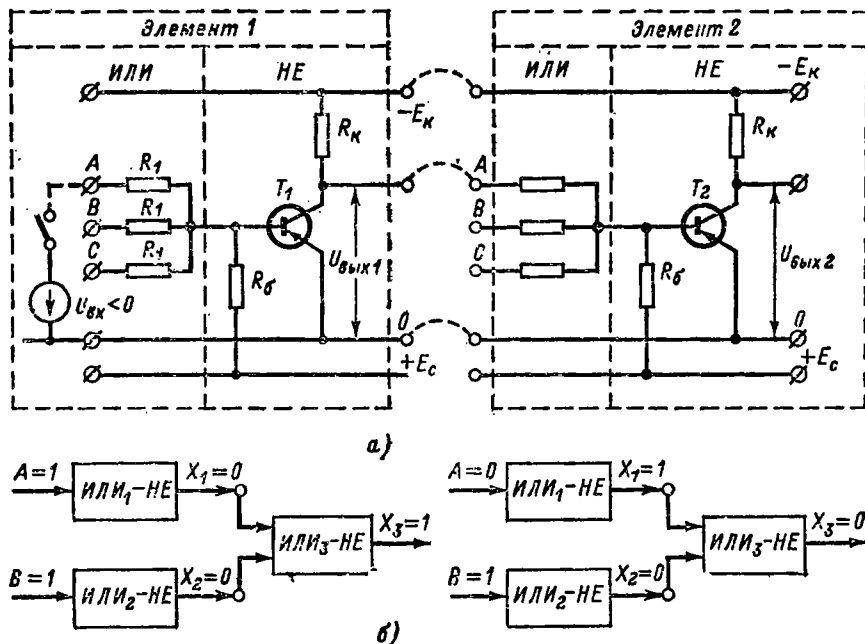


Рис. 11-50. Логические схемы на типовых элементах ИЛИ — НЕ.

а — схема ИЛИ с усилением сигнала; б — варианты логических схем на элементах ИЛИ — НЕ.

ЛОГИКА. Эти серии могут использоваться и в устройствах релейной защиты. В качестве основного типового элемента в системе ЛОГИКА принят элемент, построенный на сочетании двух логических схем ИЛИ и НЕ. С учетом, что схема НЕ осуществляет инверсию сигнала, такой типовой элемент называется также «ИЛИ с инверсией».

Схема ИЛИ выполнена на активных сопротивлениях R , а схема НЕ — на полупроводниковом триоде типа $p-n-p$. Все остальные элементы логических схем выполняются в виде различных сочетаний этого типового элемента.

Схема элемента ИЛИ — НЕ приведена на рис. 11-50, а. Здесь показано два элемента ИЛИ — НЕ 1 и 2. На вход А, В, С элемента 1 подается сигнал отрицательного знака по отношению к об-

шей точке схемы 0 ($U_{вх} < 0$). При отсутствии сигнала $U_{вх} = 0$, на базу триода T_1 подано положительное напряжение смещения $+E_{см}$, триод T_1 заперт и на его выходе имеется напряжение $U_{вых} = U_k = -E_k$.

При появлении отрицательного сигнала $U_{вх} > E_{см}$ триод T_1 открывается и $U_{вых} = 0$. Такой элемент **ИЛИ — НЕ** обладает важной особенностью. При подаче на его вход сигнала $U_{вх}$, условно принимаемого равным 1, выходной сигнал отсутствует, $U_{вых} = 0$, а при входном сигнале $U_{вх} = 0$ выходной сигнал отличен от нуля (или условно $U_{вых} = 1$). Эта особенность должна учитываться при образовании логических схем **ИЛИ**, **И**, **НЕ**, путем сочетания типовых элементов **«ИЛИ с инверсией»**.

Так, для осуществления логической операции **ИЛИ** необходимо соединить последовательно два элемента **ИЛИ — НЕ** (элементы 1 и 2 на рис. 11-50). Тогда при подаче на зажимы *A*, или *B*, или *C* элемента 1 отрицательного сигнала — $U_{вх}$ триод T_1 открывается, а триод T_2 закрывается, в результате чего на выходе элемента 2 появляется сигнал $U_{вых} = E_k$. При $U_{вх} = 0$ сигнал на выходе элемента 1 равен 1, а на выходе элемента 2 равен 0. Таким образом, рассмотренное сочетание двух элементов **ИЛИ — НЕ** действует как логическая схема **ИЛИ**, при этом наличие триодов позволяет усилить сигнал элемента **ИЛИ**, компенсируя ослабление входного сигнала в сопротивлениях *R* схемы.

Логическая операция **И** для двух сигналов *A* и *B* осуществляется путем соединения элементов **ИЛИ — НЕ** по схеме 11-50, 6. В этой схеме каждый элемент 1 и 2 преобразует входные сигналы, равные 1, в сигнал, равный 0, а элемент 3 преобразует 0 на выходе в сигнал, равный 1. Выходы триодов элементов 1 и 2 соединены параллельно, поэтому входной сигнал на элементе 3 равен 0 только при условии, что выходные сигналы элемента 1 и элемента 2 равны 1. В этом случае на выходе элемента 3 появится сигнал, равный 1. Если же хотя бы на одном из элементов 1 или 2 сигнал равен 0, то сигнал на входе элемента 3 равен 1, а на выходе элемента 3 — 0.

Элементы серии **ЛОГИКА** следует рассматривать как пример типовых элементов. Окончательных общепринятых типовых элементов пока еще не создано.

Элементы выдержки времени. В качестве элемента выдержки времени в схемах на полупроводниках применяются конденсаторные реле времени, в которых для создания выдержки времени t_p используется продолжительность заряда (или разряда) конденсатора *C*, включенного последовательно с активным сопротивлением *R*.

Принцип устройства реле времени, основанного на заряде конденсатора, показан на рис. 11-51. Реле состоит из зарядной цепи *RC*, делителя напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 и реагирующего органа (пульс-индикатора) *PO*, включенного между точками *a* и *b* через диод *D*. Нормально конденса-

тор зашунтирован пусковым устройством Π , напряжение $U_C = 0$, при этом потенциал точки a больше потенциала точки b ($U_a > U_b$), поэтому диод D заперт и ток в PO отсутствует.

При появлении сигнала на входе реле времени пусковое устройство Π срабатывает и дешунтирует конденсатор C , после чего он начинает заряжаться током I_3 , протекающим по контуру RC . При этом напряжение U_C растёт по экспоненциальному закону:

$$U_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (11-47)$$

где τ — постоянная времени, равная RC .

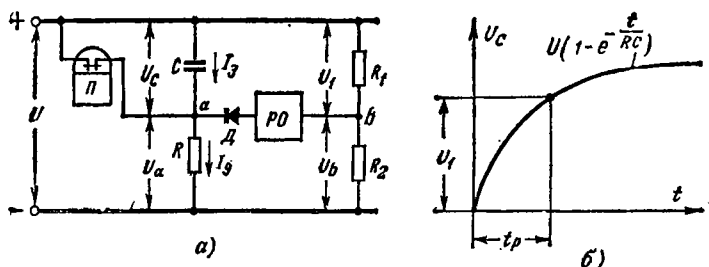


Рис. 11-51. Принципиальная схема конденсаторного времени.

a — схема реле; b — зависимость $U_C = f(t)$.

Графически зависимость $U_C = f(t)$ показана на рис. 11-51, b . По мере заряда конденсатора потенциал в точке a приближается к потенциалу точки b . Когда U_C достигнет напряжения на сопротивлении R_1 делителя напряжения (U_1 на рис. 11-51, b), потенциалы точек a и b уравниваются, затем $U_a = U - U_C$ станет меньше U_b , тогда диод D откроется и реагирующий орган сработает. Время, в течение которого конденсатор C заряжается до напряжения точки a делителя, является выдержкой времени реле (t_p), а $U_C = U_1 = U_{c.p.}$

Аналитически значение t_p можно получить из (11-47), приняв $U_C = U_{c.p.}$:

$$t_p = RC \ln \frac{U}{U - U_{c.p.}}. \quad (11-48)$$

Из (11-48) и рис. 11-51, b следует, что t_p зависит от C , R , $U_{c.p.}$ и U . Выдержка времени реле обычно регулируется изменением R , что меняет скорость нарастания U_C . При прекращении входного сигнала пусковое устройство Π вновь шунтирует конденсатор C , он разряжается и нуль-индикатор прекращает свою работу (реле времени возвращается). Разряд продолжается в течение сотых долей секунды, после чего реле вновь готово к действию.

Основная трудность выполнения конденсаторного реле времени состоит в обеспечении его точности. Погрешность реле времени,

д) Примеры схем бесконтактных релейных защит на полупроводниках

В качестве примера бесконтактной защиты на полупроводниках, разработанной ВНИИЭлектропривод на типовых элементах ЛЮГИКА, в приложении приводится схема максимальной защиты, выпускаемая ЧЭАЗ для линий 6—10 кВ. Ниже приводится более сложная схема одноступенчатой трехсистемной дистанционной защиты, разработанная ВНИИЭ [Л. 56]. Эта защита предназначена для использования в качестве резервной от междуфазных к. з. на линиях 110—220 кВ.

Структурная схема защиты представлена на рис. 11-53. Защита состоит из дистанционного органа 1, выполненного с помощью трех направленных реле сопротивления с эллипти-

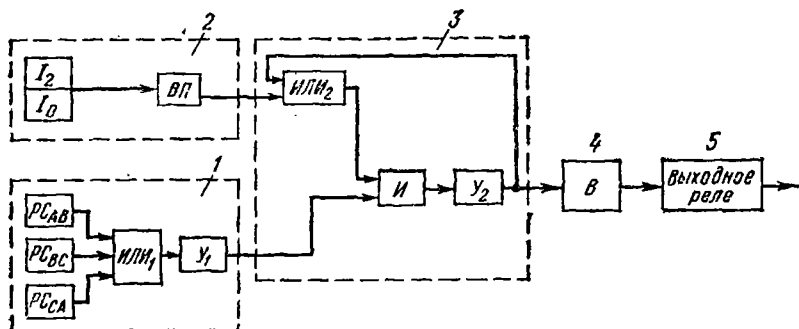


Рис. 11-53. Структурная схема одноступенчатой дистанционной защиты на полупроводниках.

ческой характеристикой; пускового органа 2, реагирующего на I_2 и I_0 ; логической схемы 3, осуществляемой с помощью элементов ИЛИ, И и усилителей У; конденсаторного реле времени 4 и исполнительного органа 5. Все элементы схемы выполнены на полупроводниках, кроме исполнительного органа, в качестве которого используется электромеханическое реле типа РП-7.

Реле сопротивления РС действуют на элемент ИЛИ, выполненный на трех диодах по схеме рис. 11-45. Для увеличения мощности выход схемы ИЛИ₁ заведен на усилитель У₁.

Пусковое реле в данной защите не является обязательным, поскольку дистанционный орган защиты отстроен от нагрузки. Пусковой орган предусмотрен для исключения неправильной работы защиты при нарушениях в питающих ее цепях напряжения и отстройки от нагрузки и качаний в симметричном режиме. Выходной сигнал пускового реле I_2 и I_0 воздействует на элемент временной памяти ВП, который как бы запоминает полученный сигнал и продолжает его передавать в течение 0,1 с после прекращения действия реле I_2 и I_0 . Такая работа ВП равносильна замедлению возврата пускового реле и необходима для надежного действия пос-

ледного при трехфазных к. з., когда токи несимметрии I_2 и I_0 возникают кратковременно, лишь в начале к. з., в течение 0,01—0,03 с.

Защита приходит в действие, если на элемент *И* поступает входной сигнал от пускового органа (через элемент *ИЛИ*₂) и от дистанционного органа одновременно. Возникающий при этом выходной сигнал на элементе *И* усиливается усилителем $У_2$ и подается на реле времени *В*. По истечении заданной выдержки времени t_3 реле времени срабатывает и посылает сигнал на исполнительный орган, который с помощью поляризованного реле РП-7 дает команду на отключение выключателя линии.

Для обеспечения действия защиты при симметричных трехфазных к. з., когда импульс, подаваемый пусковым органом (реагирующим на первоначальную несимметрию), прекращается значительно раньше, чем срабатывает реле времени защиты, предусмотрена обратная связь с выхода усилителя $У_2$. Одновременно с подачей сигнала на реле времени по цепи обратной связи подается сигнал на элемент *ИЛИ*₂. Благодаря этому при трехфазных к. з. после прекращения сигнала от пускового органа элемент *ИЛИ*₂ будет продолжать посылку сигнала на элемент *И* за счет обратной связи. Таким образом, создается своеобразная цепь самоудерживания от дистанционных органов схемы, обеспечивающая действие защиты при кратковременном срабатывании пускового органа.

Полные схемы элементов защит показаны на рис. 11-54 и 11-55.

Пусковой орган (рис. 11-54) реагирует на I_2 и I_0 , которые получают от фильтра обратной последовательности Φ_2 и трансформатора T_0 и выпрямляются мостами B_1 и B_2 . На стороне выпрямленного тока мосты соединены параллельно. Для сглаживания выпрямленного напряжения предусмотрен конденсатор C_3 . Напряжение между точками 1 и 2 (рис. 11-54) определяется величиной большого тока (I_2 или I_0).

Реагирующим элементом пускового органа, обладающим временной памятью, являются триоды T_3 и T_4 .

Параметры сопротивлений ($R_{12} - R_{10}$ и $R_{14} - R_{11}$) подобраны таким образом, что потенциал эмиттера триода T_3 при отсутствии I_2 и I_0 получается выше потенциала базы, вследствие чего триод T_3 закрыт. При этом на базу T_4 подается положительный потенциал (через R_{15}). Триод T_4 открыт и напряжение на выходных зажимах органа *И*-7 равно нулю, так как они зашунтированы открытым триодом T_4 .

При появлении I_2 или I_0 выпрямленный ток I замыкается по сопротивлению R_{10} и на его зажимах появляется напряжение $U = IR_{10}$, пропорциональное этим токам. При определенном значении I_2 или I_0 потенциал точки 2 повышается настолько, что диод D_6 закрывается, вызывая увеличение потенциала в точке 3. В результате этого триод T_3 открывается, а триод T_4 вследствие понижения потенциала в точке 4 закрывается, размыкая цепь между *И* и 7. На выходе пускового органа (точки *И* и 7) появляется напряжение, означающее, что он сработал.

При исчезновении I_2 и I_0 триод T_3 снова закрывается. Но благодаря памяти, осуществленной с помощью заряженного конденсатора C_5 , T_4 открывается не сразу, а только через 0,01 с, пока не разрядится C_5 . Эта емкость была заряжена при предшествующем открытии триода T_3 током, протекавшим по цепи $C_5 - R_{11}$. Потенциал точки 4, от которого зависит состояние триода T_4 , по мере разряда емкости C_5 повышается.

По окончании разряда, продолжающегося 0,01 с, потенциалы точек 4 и 7 (базы и эмиттера) становятся равными, триод T_4 открывается и выходное на-

пряжение (сигнал) на зажимах II-7 исчезает. Таким образом, с помощью конденсатора C_3 осуществляется временное запоминание появления I_2 или I_0 . Регулирование установки срабатывания реле производится изменением напряжения, снимаемого с фильтров обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей.

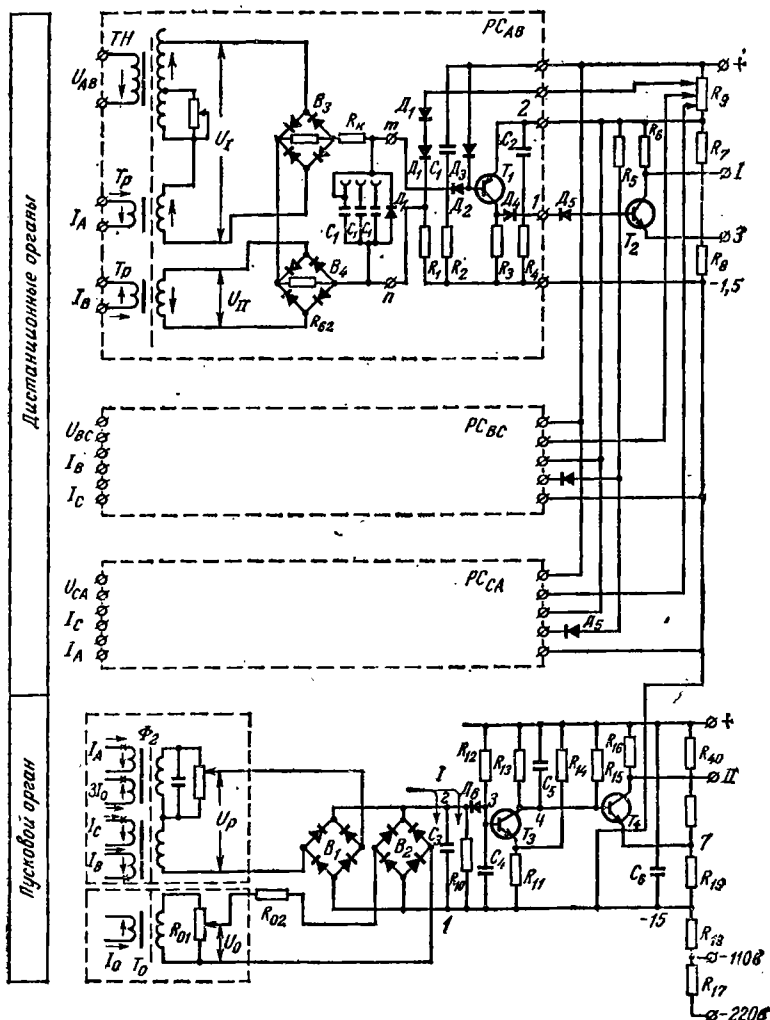


Рис. 11-54. Схема пускового и дистанционного органов защиты (напряжения $\dot{U}_I = \dot{U}_{AB} - k\dot{I}_{AB}$; $\dot{U}_{II} = k\dot{U}_{AB}$; $\dot{U}_p = k\dot{I}_2$; $\dot{U}_0 = k\dot{I}_0$).

Дистанционный орган. В качестве реле сопротивлений PC (рис. 11-54) применяются реле, рассмотренные в § 11-6. Они включаются на междуфазное напряжение и разность фазных токов по табл. 11-1.

Реле PC состоит из промежуточного трансформатора напряжения TH и трансреакторов TP , с помощью которых получают напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Эти напряжения выпрямляются выпрямителями B_3 и B_4 , а затем сравниваются посредством схемы сравнения, построенной на балансе напряжения. На выходных зажимах m и n получается напряжение $\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$, подводимое к нуль-индикатору.

Нуль-индикатор является двухкаскадным усилителем на триодах T_1 (типа $p-n-p$) и T_2 (типа $n-p-n$).

Триод T_2 является общим для всех трех реле РС. Для этого выходной зажим 1 триода T_1 каждого реле связан с базой T_2 через диод D_5 по схеме ИЛИ.

При отсутствии напряжения на зажимах m и n или при его отрицательном знаке триод T_1 открыт, на диоды D_5 подается обратное напряжение и они закрываются. База триода T_2 имеет по отношению к эмиттеру положительный потенциал (через R_6), поэтому триод T_2 открыт и напряжение на выходных зажимах 1—3 равно нулю.

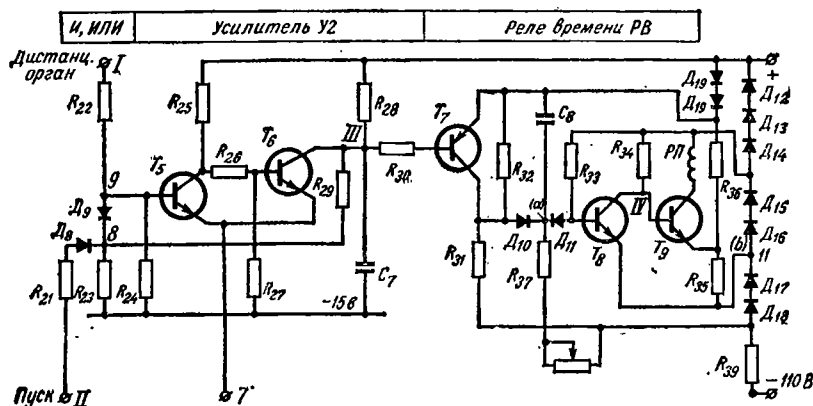


Рис. 11-55. Логическая часть схемы однотупенчатой дистанционной защиты.

При появлении положительного напряжения на выходе схемы сравнения (зажимы m и n) триод T_1 закрывается. Конденсатор C_2 начинает заряжаться, и когда потенциал точки 7 станет равным потенциалу в точке 3, диод D_5 откроется, в результате чего потенциал базы T_2 станет ниже потенциала эмиттера и триод T_2 откроется. На выходных зажимах 1—3 появляется напряжение, воздействующее на логическую часть защиты.

Конденсаторы C_1 служат для регулирования величины малой оси эллиптической характеристики срабатывания реле. Конденсатор C_2 создает замедление срабатывания реле на 0,1 с.

Логическая схема защиты изображена на рис. 11-55. Она состоит из логических элементов ИЛИ₂ (рис. 11-53) и И (R_{21} , R_{22} , R_{23} , R_{29} , D_8 , D_9), усилителя $У_2$ (рис. 11-53), реле времени РВ и выходного реле РИ.

К зажиму I схемы подается сигнал от дистанционного органа, а к зажиму II — от пускового. Сопротивления R_{21} и R_{29} образуют элемент ИЛИ₂, выходом которого является точка 8. При появлении сигнала II от пускового органа ИЛИ от обратной связи через сопротивление R_{29} в точке 8 появляется напряжение.

Точка 9 является выходом элемента И₁ и одновременно входом усилителя $У_2$, состоящего из двух триодов T_5 и T_6 . Элемент И образуется с помощью диода D_9 и сопротивления R_{22} , по которому поступает сигнал I от дистанционного органа, и точки 8, с которой приходит сигнал II от пускового реле.

Если пусковой и дистанционные органы защиты не действуют, то сигналы I и II отсутствуют. При этом потенциал базы триода T_5 (точка 9) ниже,

чем у его эмиттера (точка 7), вследствие чего T_5 закрыт. Закрыт также и диод D_9 , поскольку на него подано обратное напряжение. Усилитель $У_2$ и реле времени не работают. В случае появления сигнала II потенциал точки 9 (от которого зависит работа T_5) не меняется, так как диод D_9 закрыт и не пропускает сигнал II . При появлении сигнала I потенциал зажима I повышается, но при этом открывается диод D_9 , в результате чего потенциал точки 9 остается ниже точки 7 и триод T_5 не работает.

При действии пускового и дистанционного органов сигналы I и II появляются одновременно. Сигнал II держит диод D_9 запертым, и благодаря этому под влиянием сигнала I потенциал точки 9 повышается.

Таким образом, на выходе элемента $И$ появляется сигнал, в результате которого триод T_5 открывается, а T_6 закрывается. Это вызывает повышение потенциала, т. е. появление сигнала на выходном зажиме III усилителя $У_2$.

При появлении сигнала III триод T_7 закрывается и депультирует конденсатор C_8 , чем осуществляется пуск реле времени. Последнее работает так же, как и схема на рис. 11-52.

Нуль-индикатор реле времени состоит из триодов T_8 и T_9 . При срабатывании реле времени (т. е. открытии триода T_9) под действием коллекторного тока триода T_9 приходит в действие выходное реле $РИ$, которое подает импульс на отключение.

Сигнал III по цепи обратной связи R_{29} поддерживает повышенный потенциал в точке 8, не позволяющий работать диоду D_9 . Таким образом поддерживается работа $У_2$ и реле времени при трехфазных к. з., сопровождающихся кратковременным появлением сигнала II .

Рассмотренная защита имеет в 4 раза меньшие габариты по сравнению с аналогичной одноступенчатой дистанционной защитой с реле типа КРС-131. Потребление цепей напряжения защиты равно 3 В · А, а токовых цепей составляет 1 В · А при токе 5 А. Для устранения мертвой зоны предусматривается смещение характеристики реле сопротивления в III квадранте примерно на 10%. Угол $\varphi_{м.ч}$ имеет две уставки: 60 и 80°.

11-15. ВЫБОР УСТАВОК ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Ниже рассматривается выбор характеристик трехступенчатой защиты на примере участка сети, показанного на рис. 11-56 [Л. 81]. Выбираются уставки защиты A , уставки защит B и C принимаются заданными. Для большей наглядности характеристики согласуемых между собой дистанционных защит $t_3 = f(z)$ обычно изображаются графически на диаграмме в осях t, z (рис. 11-56, б). По оси z откладываются первичные сопротивления прямой последовательности z_1 рассматриваемых участков сети.

При выборе сопротивлений срабатывания дистанционных органов необходимо учитывать погрешности, вызывающие отклонение $z_{с.р}$ от принятой уставки z_y , считаем, что $z_{с.р} = z_y \pm \Delta z$. На величину Δz влияют погрешности реле, измерительных трансформаторов и неточность настройки реле на заданную уставку z_y .

Помимо того возможна погрешность в определении сопротивлений участков сети, что учитывается дополнительным запасом.

Первая зона защиты. Время срабатывания первой зоны не регулируется, оно определяется собственным временем действия реле и в зависимости от конструкции реле составляет: $t_1 = 0,02 \div 0,15$ с.

Сопротивление срабатывания первой зоны $z_{1А}$ выбирается из условия, чтобы дистанционный орган

этой зоны не мог сработать за пределами защищаемой линии ЛІ (рис. 11-56).

Выполнение этого условия необходимо для обеспечения селективности, поскольку первая зона не имеет выдержки времени.

Поэтому z_{IA} выбирается меньше сопротивления защищаемой линии z_{IL} так, чтобы при максимальной положительной погрешности $+ \Delta z$ выполнялось условие $(z_{IA} + \Delta z) < z_{IL}$ (рис. 11-57).

В соответствии с этим z_{IA} рассчитывается по выражению

$$z_{IA} = k_1 z_{IL}, \quad (11-49)$$

где z_{IL} — сопротивление прямой последовательности защищаемой линии ЛІ; k_1 — коэффициент, учитывающий с некоторым запасом погрешности Δz , могущие вызвать увеличение $z_{c.p.}$ Величина k_1 зависит от точности реле, для реле КРС $k_1 = 0,85$.

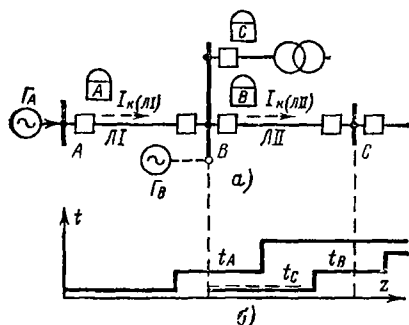


Рис. 11-56. Участок сети, защищаемый защитой А (а), и изображение характеристик выдержек времени дистанционных защит в осях z, t (б).

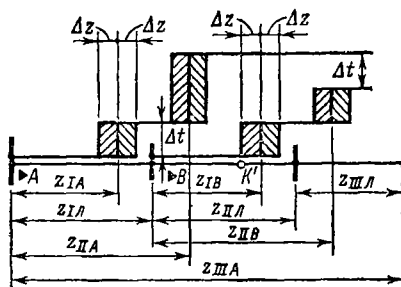


Рис. 11-57. Согласование характеристик дистанционных защит А и В двух смежных линий (рис. 11-56).

Погрешность трансформаторов тока приводит к сокращению зоны действия защиты. Поэтому трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, следует выбирать по кривым предельной кратности (при 10%-ной погрешности) при максимальном токе к. з. в конце первой зоны.

Вторая зона. Вторая зона защиты должна надежно охватывать защищаемую линию ЛІ, поэтому она выходит за ее пределы.

Для обеспечения селективности сопротивление срабатывания z_{IIA} и выдержку времени второй зоны t_{IIA} отстраивают от быстродействующих защит трансформаторов и линий, отходящих от шин противоположной подстанции (рис. 11-57). Выдержка времени выбирается равной:

$$t_{IIA} = t_{IB} + \Delta t, \quad (11-50)$$

где t_{IB} — максимальное время действия быстродействующих защит следующего участка ($t_{IB} \approx 0,1$ с).

С учетом возможного сокращения первой зоны защиты B на Δz (рис. 11-57) вторая зона защиты A должна быть отстроена от точки K' аналогично тому, как отстраивалась первая зона этой же защиты от конца линии (т. е. от точки B). Сопротивление от защиты A до K' равно $z_{II} + k_{Iz_{IB}}$, откуда

$$z_{IIA} = k_{II} (z_{II} + k_{Iz_{IB}}), \quad (11-51)$$

где k_I — коэффициент, учитывающий сокращение z_{IB} на Δz , принимается равным 0,85—0,9; k_{II} — коэффициент, учитывающий возможное увеличение z_{IIA} в результате погрешностей дистанционного органа второй зоны защиты A , принимается равным 0,85.

При нескольких источниках питания (Γ_A и Γ_B на 11-56, а) z_{IIA} выбирается с учетом токораспределения по выражению

$$z_{IIA} = k_{II} (z_{II} + k_T k_{Iz_{IB}}), \quad (11-52)$$

где k_T — коэффициент токораспределения, равный отношению тока к. з. $I_{K(III)}$, проходящему по линии III , к току к. з. $I_{K(II)}$, текущему по линии II :

$$k_T = \frac{I_{K(III)}}{I_{K(II)}}. \quad (11-53)$$

Коэффициент k_T должен выбираться при таком реальном режиме, когда $I_{K(II)}$ имеет максимальное значение, а $I_{K(III)}$ — минимальное.

Для отстройки от к. з. за трансформаторами и T подстанции B с учетом токораспределения вторая зона должна удовлетворять условию

$$z_{IIA} = k_{II} [z_{I(II)} + k_T z_{IT}], \quad (11-54)$$

где z_{IT} — сопротивление наиболее мощного трансформатора на подстанции B , учитывается наименьшее z_{IT} , имеющее место при регулировании напряжения изменением коэффициента трансформации (Δn) рассматриваемого трансформатора (по данным завода); коэффициент токораспределения

$$k_T = \frac{I_{K(T)}}{I_{K(II)}};$$

k_{II} — то же, что и в выражении (11-51).

За окончательную величину z_{IIA} принимается меньшее из двух значений по выражениям (11-52) и (11-54).

В ы б р а н н о е z_{IIA} проверяется по условию надежного действия (ч у в с т в и т е л ь н о с т и) при к. з. на шинах подстанции В. Согласно ПУЭ

$$k_q = \frac{z_{IIA}}{z_{I(LI)}} \geq 1,25.$$

Для линий с сопротивлением 5—20 Ом следует стремиться, чтобы $k_q = 1,5 \div 2$, так как при малом k_q защиты на линиях с небольшим сопротивлением могут отказывать при к. з. через сопротивление дуги.

Если вторая зона ненадежно охватывает защищаемую линию, т. е. $k_q < 1,25$, то ее можно отстраивать не от первой, а от конца второй зоны защиты В. При этом время действия второй зоны защиты А должно отстраиваться от времени второй зоны защиты В: $t_{IIB} = t_{IIV} + \Delta t$, а величина z_{IIA} должна выбираться по выражению (11-52), в котором вместо z_{IV} нужно подставить z_{IIB} .

Третья зона. Третья зона должна резервировать защиты при соединений, отходящих от шин подстанции В. Уставки срабатывания этой зоны выбираются, как правило, по условию отстройки от н а г р у з к и, а выдержка времени — по условию с е л е к т и в н о с т и. Третья зона осуществляется пусковыми реле дистанционной защиты, в качестве которых используются токовые реле или реле сопротивления.

Ток срабатывания токовых пусковых реле выбирается так же, как и у максимальной защиты, по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_3 I_{\text{раб. макс}}}{k_{\text{воз}}}, \quad (11-54a)$$

где $k_n = 1,2$ — коэффициент надежности; k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение тока за счет самозапуска заторможенных электродвигателей; $I_{\text{раб. макс}}$ — максимальный ток нагрузки с учетом ее увеличения, обусловленного отключением соответствующего участка прилегающей сети (например, параллельной линии или второй линии, питающей подстанцию, и т. д.); $k_{\text{воз}}$ — коэффициент возврата.

Если необходимо обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в защите ПЗ-152 и ДЗ-1), то $I_{с.з}$ должно удовлетворять также второму условию

$$I_{с.з} = k_n I_{\text{неп. ф}}^{(2)}, \quad (11-55)$$

где $k_n = 1,2$; $I_{\text{неп. ф}}^{(2)}$ — максимальное значение тока в неповрежденной фазе при двухфазном к. з. на защищаемой линии.

Чувствительность пускового органа проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования по минимальному значению $I_{к.з.}$. Согласно ПУЭ $k_q = I_{к. мин} / I_{с.з}$ в первом случае должен быть не меньше 1,5, а во втором — 1,2.

Сопротивление срабатывания третьей зоны $z_{с.з} = z_{IIA}$ ненаправленного реле сопротивления выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления $z_{\text{раб. мин}}$, появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего к. з.

Наименьшее значение $z_{\text{раб. мин}}$ имеет место при максимальном токе нагрузке в фазе $I_{\text{раб. макс}}$ и пониженном уровне рабочего напряжения $U_{\text{раб. мин}}$, обычно принимаемого на 5—10% меньше номинального:

$$z_{\text{раб. мин}} = \frac{U_{\text{раб. мин}}}{k_{\text{в}} I_{\text{раб. макс}} \sqrt{3}}. \quad (11-56)$$

Здесь под $U_{\text{раб. мин}}$ подразумевается линейное напряжение.

Для обеспечения надежного возврата пускового органа в худших условиях $z_{\text{с. з}}$ находится из уравнения

$$z_{\text{с. з}} = \frac{z_{\text{раб. мин}}}{k_{\text{н}} k_{\text{воз}}}, \quad (11-57)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий погрешности реле, принимается равным $1,1 \div 1,2$; $k_{\text{воз}}$ — коэффициент возврата реле; $k_{\text{з}}$ — коэффициент, учитывающий самозапуск двигателей.

Полученное $z_{\text{с. з}}$ является максимальным допустимым значением по условию возврата реле и расчетным значением z_{IIA} .

При необходимости обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в односистемной защите) $z_{\text{с. з}}$ отстраивается также от минимального значения сопротивления в неповрежденной фазе $z_{\text{неп. ф}}^{(2)}$ при двухфазном к. з.

В этом случае, кроме условия (11-57), необходимо выполнить второе условие:

$$z_{\text{с. з}} = k_{\text{н}} z_{\text{неп. ф. мин}}^{(2)}, \quad (11-58)$$

где $k_{\text{н}} = 0,85 \div 0,9$.

Чувствительность пускового реле проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования и оценивается коэффициентом

$$k_{\text{ч}} = \frac{z_{\text{IIA}}}{z_{\text{к. макс}}},$$

где $z_{\text{к. макс}}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в расчетной точке.

Согласно ПУЭ при к. з. в конце второго участка допускается $k_{\text{ч}} \geq 1,2$.

Сопротивление срабатывания пускового направленного реле сопротивления выбирается, как и у ненаправленных реле, из условия отстройки от нагрузки по формуле (11-57). Поскольку $z_{\text{с. з}}$ направленного реле сопротивления зависит от угла $\varphi_{\text{р}}$, найденное сопротивление срабатывания $z_{\text{с. з(н)}}$ должно иметь место при $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{н}}$, соответствующем нагрузочному режиму работы линии.

При к. з. $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{л}} = \varphi_{\text{м. ч}}$, и поэтому реле работает с максимальной чувствительностью, т. е. с $z_{\text{с. з. макс}}$ (рис. 11-58).

Значение $z_{\text{с. з. макс}}$, допустимое по условиям нагрузки $z_{\text{с. з(н)}}$, можно найти из уравнения срабатывания направленного реле сопротивления:

$$z_{\text{с. з}} = z_{\text{с. з. макс}} \cos(\varphi_{\text{м. ч}} - \varphi_{\text{р}}).$$

Подставив в него найденные из (11-57) величины $z_{с.з(н)}$ и φ_H вместо $z_{с.з}$ и φ_P , получим:

$$z_{с.в. макс} = \frac{z_{с.з(н)}}{\cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_H)} = \frac{z_{раб. мин}}{k_H k_{воз} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_H)}. \quad (11-59)$$

Найденное значение $z_{с.з. макс}$ является диаметром окружности характеристики срабатывания реле и уставкой z_{II} , удовлетворяющей условию отстройки от максимальной нагрузки защищаемой линии.

Чувствительность пускового реле определяется по выражению

$$k_{ч} = \frac{z_{с.з. макс}}{z_{к. макс}},$$

где $z_{к. макс}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в конце второго участка, резервируемого данной защитой.

В некоторых случаях для уменьшения t_{II} сопротивление срабатывания z_{IIA} можно согласовывать с концом зоны z_{IIA} следующего участка, если при этом обеспечивается достаточное резервирование присоединений, отходящих от шин подстанции В. Тогда $t_{IIA} = t_{IIA} + \Delta t$, при этом под t_{IIA} подразумевается наибольшая выдержка времени резервируемых защит.

Условие отстройки от $z_{раб. мин}$ при выборе z_{II} сохраняется и в этом случае.

Вторичные величины сопротивлений срабатывания. Для пересчета полученных первичных сопротивлений на вторичную сторону необходимо вычислить вторичные значения напряжения и тока, соответствующие первичным значениям $U_{р.п}$ и $I_{р.п}$:

$$U_{р.в} = \frac{U_{р.п}}{n_{II}} \text{ и } I_{р.в} = \frac{I_{р.п}}{n_T}.$$

Исходя из этого, находят вторичное сопротивление срабатывания на зажимах реле:

$$z_{с.р} = \frac{U_{р.в}}{I_{р.в}} = z_{с.з} \frac{n_T}{n_{II}}. \quad (11-60)$$

Подставляя в (11-60) вместо $z_{с.з}$ значения z_I , z_{II} и z_{III} , находят значения вторичных сопротивлений срабатывания.

Все реле сопротивления должны работать в диапазоне токов к. з., лежащем между токами точной работы реле, с тем чтобы погрешность реле не превышала 10%. Для проверки выполнения этого условия по техническим данным на реле определяются значения тока точной работы при выбранных уставках. Эти значения токов сопоставляются с максимальными и минимальными величинами $I_{к.з}$, имеющими место в конце данной зоны.

Особенность выбора уставок срабатывания первой и второй зон на линиях с ответвлениями. На линиях с ответвлениями, питающими понижительные под-

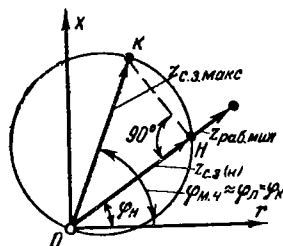


Рис. 11-58. Выбор $z_{с.з}$ направленного реле сопротивления.

станции (рис. 11-59), первая и вторая зоны выбираются по рассмотренным выше условиям и дополнительно отстраиваются от к. з. за трансформатором ответвления.

Такое ограничение их действия позволяет обеспечить селективность дистанционной защиты с максимальными защитами трансформатора ответвления и питающей от него сети без увеличения выдержки времени t_I и t_{II} первой и второй зон защиты.

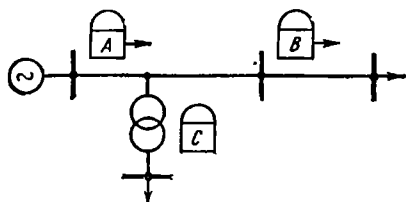


Рис. 11-59. Схема, поясняющая выбор уставок дистанционной защиты на линиях с ответвлениями.

Отстройка z_{II} производится по формуле (11-54), где вместо $z_{I(LI)}$ подставляется сопротивление линии от места установки защиты А до трансформатора ответвления.

Отстройка ведется для наиболее тяжелого случая, когда линия отключена с противоположной стороны ($k_T = 1$).

В нормальном режиме работы линии за счет подпитки места к. з. со стороны подстанции В запас отстройки от к. з. за трансформатором повышается.

Выдержка времени t_{II} выбирается по условию (11-50). При этом допускается неселективное действие первой зоны защиты А, имеющей $t_I = 0$, при к. з. в трансформаторе ответвления. Эта неселективность устраняется с помощью АПВ на линии. Вторая зона при повреждении в трансформаторе действует селективно, поскольку t_{II} отстраивается от быстродействующих линий и трансформаторов.

Чувствительность третьей зоны защиты должна проверяться по к. з. за трансформатором ответвления, а выдержка времени t_{II} должна быть отстроена от времени действия максимальной защиты этого трансформатора.

11-16. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Выполнение защит на дистанционном принципе имеет целый ряд существенных преимуществ, способствовавших широкому применению этих защит в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

Главными достоинствами дистанционного принципа являются:

1. Селективность действия в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания.

2. Малые выдержки времени в начале защищаемого участка, которые обеспечиваются первой зоной, охватывающей до 85—90% защищаемой линии, что необходимо по условиям устойчивости, требующим быстрого отключения повреждений вблизи шин электростанции и мощных узловых подстанций.

3. Значительно большая чувствительность при к. з. и лучшая отстройка от нагрузки и качаний по сравнению с токовыми максимальными защитами.

К числу недостатков дистанционных защит следует отнести:

1. Сложность защиты как в части схемы, так и в части входящих в ее состав реле. Дистанционные защиты с электромеханическими реле являются самыми многорелейными и многоконтактными защитами.

Бесконтактные защиты на полупроводниковых приборах отличаются сложностью логической части схемы и большим количеством элементов в ней.

2. Невозможность обеспечения мгновенного отключения к. з. в пределах всей защищаемой линии. Поэтому они не могут служить основными защитами на тех участках сети, где необходимо выполнение этого требования.

3. Реагируют на качания и нагрузку. Необходимость отстройки от последней существенно ограничивает чувствительность защиты и понижает ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков, а возможность действия при качаниях вынуждает усложнять защиту применением блокировки.

4. Возможность ложной работы при неисправностях в цепях напряжения, что уменьшает их надежность и вызывает необходимость применения соответствующей блокировки.

За последние годы много сделано для усовершенствования дистанционных защит, большие успехи в этой области достигнуты отечественной техникой.

В качестве реальных путей дальнейшего усовершенствования дистанционных защит можно указать на следующие возможности:

1. Сочетание дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой (см. гл. 12) или передачей отключающих импульсов на противоположный конец линии, что позволяет обеспечить быстрдействие защиты в пределах всей защищаемой линии.

2. Внедрение дистанционных защит на полупроводниковых элементах, способствующее повышению надежности защиты за счет устранения многоконтактности их схем и улучшения параметров реагирующих органов.

3. Применение упрощенных схем дистанционной защиты при использовании ее для резервирования основных защит защищаемой ВЛ и защит смежных участков.

Несмотря на отмеченные недостатки, дистанционная защита является пока наиболее совершенной резервной защитой от междуфазных к. з. для линий всех напряжений до 750 кВ включительно и достаточно быстродействующей защитой для высоковольтных сетей 110 и 220 кВ, где она с успехом используется в качестве основной защиты на линиях средней и большой длины.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

12-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ

Высокочастотные (в. ч.) защиты являются быстродействующими и предназначаются для линий средней и большой длины. Они применяются в тех случаях, когда по условиям устойчивости или дру-

циальные защиты непригодны для длинных линий вследствие высокой стоимости соединительного кабеля и недопустимого увеличения его сопротивления.

Высокочастотные защиты состоят из двух комплектов, расположенных по концам защищаемой линии. Особенность этих защит заключается в том, что для их селективного действия при внешних к. з. необходима связь между комплектами защиты, осуществляемая посредством токов высокой частоты, которые передаются по проводам защищаемой линии.

По принципу своего действия в. ч. защиты не реагируют на к. з. вне защищаемой линии и поэтому, так же как и дифференциальные защиты, не имеют выдержки времени. В настоящее время применяются два вида в. ч. защит:

а) направленные защиты с высокочастотной блокировкой (т. е. с блокировкой токами высокой частоты), основанные на сравнении направлений мощности к. з. по концам защищаемой линии;

б) дифференциально-фазные в. ч. защиты, основанные на сравнении фаз токов по концам линии.

12-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

Направленная в. ч. защита реагирует на направление (или знак) мощности к. з. по концам защищаемой линии. Как видно из рис. 12-1, а, при к. з. на защищаемой линии (в точке K_1) мощности

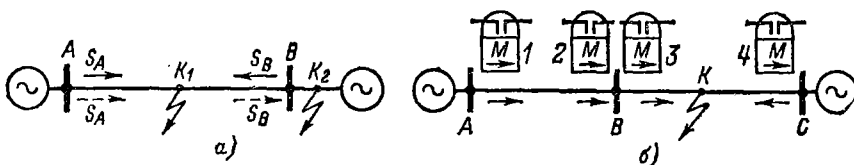


Рис. 12-1. Направление мощности по концам линии при к. з.

а — на линии (K_1) и за ее пределами (K_2); б — сравнение направления мощности по концам линии с помощью реле направления мощности М.

к. з. на обоих концах поврежденного участка АВ имеют одинаковый знак и направление от шин в линию.

В случае же внешнего к. з. (точка K_2) направление и знаки мощности по концам защищаемой линии оказываются различными. На ближайшем к месту повреждения конце линии мощность к. з. S_B отрицательна и направлена к шинам, а на удаленном положительна и направлена от шин в линию.

Из этого следует, что, *сравнивая направления мощности по концам линии, можно определить, где возникло повреждение: на линии или за ее пределами.*

Такое сравнение осуществляется при помощи реле мощности M (рис. 12-1, б), которые устанавливаются на обоих концах линии и включаются так, чтобы при к. з. на защищаемой линии они разрешали действие защит на отключение.

Поэтому при к. з. в точке K (рис. 12-1, б) действуют на отключение только защиты 3 и 4, установленные на поврежденной линии BC . На неповрежденной линии AB реле мощности защиты 1 замыкает свои контакты, разрешая ей действовать на отключение. Однако на приемном конце линии AB реле мощности защиты 2 под влиянием мощности к. з., направленной к шинам, размыкает свои

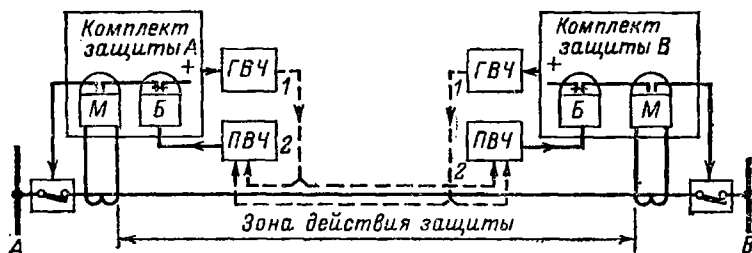


Рис. 12-2. Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой.

M — реле мощности; B — блокирующее реле; $ГВЧ$ — генератор токов высокой частоты; $ПВЧ$ — приемник токов высокой частоты.

контакты, чем запрещает действие на отключение своей защиты и одновременно блокирует действие защиты 1 посылкой блокирующего сигнала тока высокой частоты по проводам этой же линии. Блскирующий ток посылается специальными генераторами токов высокой частоты $ГВЧ$ (рис. 12-2), управляемыми реле мощности M , и принимается специальными приемниками токов высокой частоты $ПВЧ$, настроенными на ту же частоту, что и генераторы. Приняв высокочастотный сигнал, приемники выпрямляют полученный ток и подают его в обмотку блокирующего реле B , которое размыкает цепь отключения своей защиты, не позволяя ей действовать на отключение.

При к. з. на защищаемой линии блокирующий сигнал высокой частоты отсутствует, так как реле мощности, срабатывая, не позволяют действовать передатчикам высокой частоты. В этом случае контакты блокирующих реле остаются замкнутыми, разрешая реле мощности действовать на отключение.

Таким образом, блокирующий ток высокой частоты появляется в линии только при внешних к. з., обеспечивая селективную работу защиты. Зона действия защиты ограничивается трансформаторами тока, питающими реле мощности.

На рассмотренном принципе выполняются защиты, сравнивающие направления мощностей в фазах или мощности нулевой или обратной последовательности. Реле мощности в двух последних случаях включаются через соответствующие фильтры на токи и напряжения нулевой или обратной последовательности.

Из принципа действия направленной высокочастотной защиты следует, что защита состоит из двух комплектов (А и В на рис. 12-2), каждый из комплектов содержит релейную часть, реагирующую на направление мощности к. з., и в. ч. часть, генерирующую и принимающую токи высокой частоты.

12-3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЧАСТЬ ЗАЩИТЫ

а) Канал токов высокой частоты

Высокочастотным (в. ч.) каналом называют путь, по которому замыкаются токи высокой частоты, используемые для блокировки защиты.

На рис. 12-3 показан в. ч. канал по схеме фаза — земля, при которой ток высокой частоты передается по одному из проводов

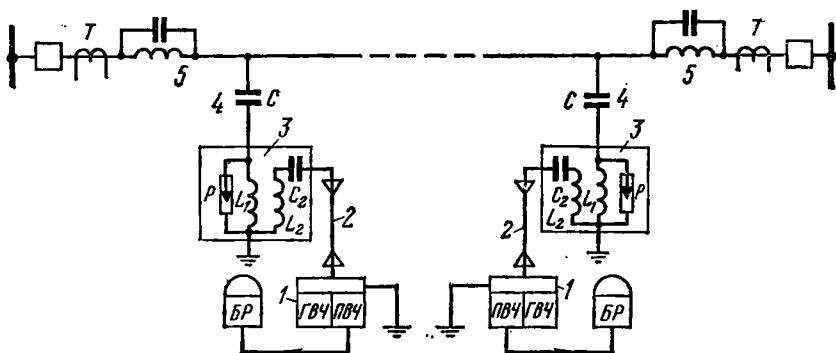


Рис. 12-3. Принципиальная схема высокочастотного канала.

линии и возвращается по земле. На каждом конце линии устанавливается в. ч. пост 1, состоящий из передатчика ГВЧ, генерирующего токи высокой частоты, и принимающего их приемника ПВЧ. Выходная цепь в. ч. поста подключается одним зажимом к земле, а вторым — к линии электропередачи через кабель 2, фильтр присоединения 3 и конденсатор связи 4. По концам провода линии, используемого для передачи токов высокой частоты, устанавливаются заградители 5, запирающие выход токами высокой частоты за пределы линии.

Второй способ передачи высокочастотных сигналов по схеме «фаза — фаза» с использованием двух проводов линии требует больше аппаратуры и в Советском Союзе не применяется.

Часть энергии, генерируемой передатчиком, теряется в элементах канала, т. е. в кабеле, фильтрах присоединения, конденсаторах связи, проводах линии высокого напряжения, и уходит через заградители. Поэтому в. ч. передатчик должен с некоторым запасом перекрывать потери в канале, обеспечивая достаточный уровень мощности в. ч. сигнала, поступающего на приемник противоположного конца.

Потери энергии, происходящие при передаче в. ч. сигнала (рис. 12-4), называются **з а т у х а н и е м** и условно характеризуются величиной

$$b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}, \quad (12-1)$$

где $P_{\text{вх}}$ — мощность на входе рассматриваемого элемента канала (в начале элемента); $P_{\text{вых}}$ — мощность, получаемая на его выходе (в конце элемента).

За единицу затухания принимается **н е п е р** (Нп). Затухание каналов в. ч. защиты в зависимости от протяженности линии высокого напряжения колеблется от 1 до 2 Нп.



Рис. 12-4. К определению затухания в элементах высокочастотного канала [см. формулу (12-1)].

6) Высокочастотный пост

Для в. ч. защит линий 110 и 220 кВ отечественной промышленностью выпускаются в. ч. посты типа ПВЗК1Ж-581 на электронных лампах и посты на полупроводниках. Для линий 330—500 кВ, имеющих большое затухание

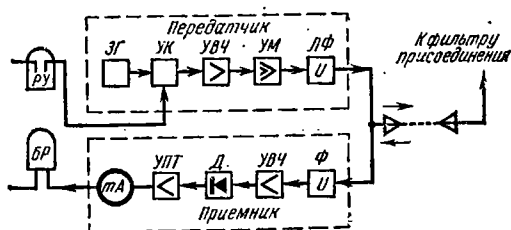


Рис. 12-5. Блок-схема высокочастотного поста.

и более высокий уровень помех, выпускаются посты с повышенной мощностью типа ПВЗД на электронных лампах, разработаны посты на полупроводниках типа ПВЗП [Ж. 55, 57]. Каждый в. ч. пост (рис. 12-5) состоит из передатчика и приемника.

Задающий генератор передатчика ЗГ является источником тока высокой частоты. Он (рис. 12-6) выполнен по индуктивной трехточечной схеме с квар-

цевым резонатором, обеспечивающим стабилизацию частоты (на рис. 12-6 не показан), и находится в режиме непрерывной работы. Мощность задающего генератора очень мала, поэтому устанавливаются промежуточный каскад УВЧ, являющийся усилителем напряжения, и усилитель мощности УМ. Линейный фильтр ЛФ служит для повышения входного сопротивления на частотах, отличных от рабочей частоты данного канала.

Пуск передатчика осуществляется подачей плюса постоянного тока на аноды и экранные сетки ламп усилителя мощности, а останов — подачей минуса на пентодную сетку лампы генератора. Управление передатчиком производится от релейной части защиты (реле РЖ). Входной сигнал, получаемый приемником, усиливается с помощью УВЧ, выпрямляется детекто-

ром D и затем после усиления усилителем постоянного тока УПТ поступает в блокирующее реле БР релейной части защиты.

Передатчик поста с повышенной мощностью в отличие от показанного на рис. 12-5 имеет дополнительный блок усиления.

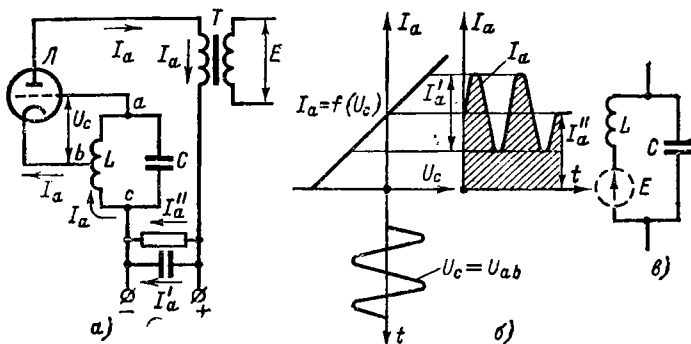


Рис. 12-6. Принципиальная схема задающего генератора (а) и зависимость его анодного тока от напряжения на сетке (б).

Все приемопередатчики рассчитаны на работу в диапазоне частот от 40 до 300 кГц. Генератор и приемник настраиваются на одну частоту.

Передатчики ПВЗК и ПВЗП имеют выходную мощность около 10 Вт при частоте 100 кГц и около 3—5 Вт при частоте 300 кГц. У передатчика ПВЗД отдаваемая мощность не менее 600 Вт.

в) Элементы высокочастотного канала

Конденсатор связи 4 (рис. 12-3) предназначен для присоединения поста к линии высокого напряжения. Сопротивление конденсатора

$x_C = \frac{1}{2\pi fC}$ зависит от частоты f проходящего через него тока. Для токов промышленной частоты 50 Гц оно велико (порядка 1 200 000 Ом), поэтому ток утечки весьма мал. При высоких частотах $f \geq 50$ кГц сопротивление x_C резко уменьшается. Отечественная промышленность выпускает бумажно-масляные конденсаторы типа СМР-55/ $\sqrt{3}$ -0,044. Они изготавливаются в виде элементов, рассчитанных на рабочее напряжение фазы 32 кВ и имеющих емкость $C = 18\,500$ пФ. На линиях 110 кВ устанавливаются два таких элемента, соединяемых последовательно, на линиях 220 кВ — четыре. Для линий 500 кВ выпускаются конденсаторы типа СМР $\frac{133}{\sqrt{3}} = 0,0186$; на таких линиях устанавливаются четыре элемента.

Высокочастотный кабель 2 (рис. 12-3). В качестве в. ч. кабеля используется кабель типа ФКБ, который является одножильным кордельным кабелем со свинцовой оболочкой и броней из стальной ленты. Входное сопротивление кабеля близко к 100 Ом, затухание 0,2 Нп на 1 км при частоте 100 кГц.

Фильтр присоединения 3 (рис. 12-3) согласовывает (уравновешивает) входное сопротивление кабеля с входным сопротивлением линии, соединяет нижнюю обкладку конденсатора связи с землей, образуя, таким образом, замкнутый контур для токов высокой частоты, и компенсирует емкость конденсатора связи, что позволяет уменьшить до минимума сопротивление конденсатора для токов высокой частоты.

Фильтр присоединения представляет собой воздушный трансформатор с отайками, позволяющими менять самоиндукцию его обмоток и взаимную

индукцию между ними. В цепи обмотки L_1 включен конденсатор связи C , а в цепи обмотки L_2 — конденсатор C_2 фильтра. Фильтр присоединения свободно пропускает токи только в определенном рабочем диапазоне частот. При этих частотах затухание фильтра относительно мало (порядка 0,15—0,25 Нп), а за пределами рабочих частот резко возрастает. Фильтр присоединения ОФП-4, выпускаемый отечественной промышленностью, выполняется на три диапазона, охватывающие частоты 50—300 кГц. Для линий 500 кВ выпускается фильтр ОКФП-500, рассчитанный на работу с конденсатором емкостью 525 пФ.

Параллельно обмотке L_1 фильтра включается разрядник P . При пробое конденсатора связи при перекрытии его изоляции разрядник срабатывает и создает надежный путь для отвода в землю токов к. з.

Заградитель 5 (рис. 12-3) преграждает выход токов высокой частоты за пределы линии. Сопротивление заградителя $z_{загр}$ зависит от частоты f . Для токов высокой частоты, передаваемых по данному каналу, $z_{загр}$ велико, а для токов промышленной частоты (50 Гц) оно очень мало.

Заградитель представляет собой резонансный контур (рис. 12-7, а), настроенный на определенную частоту — частоту в. ч. поста; он состоит из силовой индуктивной катушки L_K и элемента настройки, выполненного в виде регулируемой емкости C .

Величина C подбирается так, чтобы контур заградителя был настроен в резонанс (тока) на заданную частоту f_p , т. е. чтобы $\omega L_K = 1/\omega C$. Такой заградитель называется резонансным или одночастотным. При резонансной частоте сопротивление контура имеет максимальное значение (рис. 12-8) и носит активный характер.

Резонансное сопротивление заградителя должно быть не меньше 1000 Ом. Для защиты конденсатора C от грозовых и коммутационных перенапряжений устанавливается разрядник P . Силовая катушка заградителя рассчитывается на прохождение рабочих токов нагрузки и тока к. з.

Выпускаемые отечественной промышленностью заградители КЗ-500 рассчитаны на рабочий ток 700 А с пределами настройки 50—300 кГц.

Кроме резонансных, применяются широкополосные заградители (рис. 12-7, б и 12-8), запирающие токи в довольно широком диапазоне частот f_1 — f_2 . Такие заградители нужны для каналов, по которым одновременно передается несколько сигналов с разными частотами.

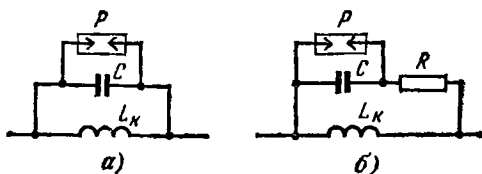


Рис. 12-7. Высокочастотный заградитель.

а — резонансный (одночастотный); б — широкополосный.

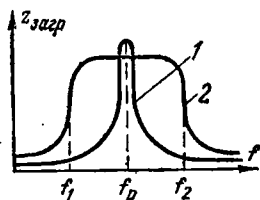


Рис. 12-8. Резонансные характеристики заградителей.

1 — резонансного; 2 — широкополосного.

12-4. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

а) Основные элементы защиты

Упрощенная схема, поясняющая принцип выполнения и действия направленных в. ч. защит, показана на рис. 12-9. Защита состоит из трех основных элементов: пускового органа, органа направления мощности и блокирующего реле B .

получаемым из анодной цепи приемника, и действует на размыкание контактов реле. При одновременном питании рабочей и тормозной обмоток реле не действует, так как тормозной момент преобладает над рабочим.

б) Работа защиты в различных режимах

При внешнем к. з. на обоих концах линии срабатывают пусковые реле P_1 и P_2 . Они пускают передатчики и подают плюс к контактам реле мощности M . На питающем конце линии, где мощность к. з. направлена от шин в линию, реле мощности срабатывает, останавливает передатчик своего комплекта, подает плюс к контактам блокирующего реле B и ток в его рабочую обмотку, подготавливая, таким образом, защиту к действию. Однако цепь отключения защиты остается разомкнутой контактами блокирующего реле, в тормозную обмотку которого поступает блокирующий ток с противоположного конца линии. На противоположном (ближнем к месту повреждения) конце линии мощность к. з. направлена к шинам, поэтому реле мощности на этом конце линии не действует, разрешая реле P_2 запустить передатчик, который посылает блокирующий ток высокой частоты. Этот ток, принятый и выпрямленный приемниками обоих постов, поступает в тормозные обмотки блокирующих реле B и не позволяет им действовать. Благодаря этому предотвращается срабатывание защиты на питающем конце линии и дополнительно осуществляется блокировка защиты на приемном конце линии, цепь отключения которой уже разомкнута контактами реле мощности. Таким образом, при внешнем к. з. блокирующий высокочастотный импульс посылается только с того конца линии, где контакты реле мощности разомкнуты, что и обеспечивает селективность защиты.

При к. з. в зоне двустороннего питания места повреждения мощность к. з. на обоих концах линии направлена от шин в линию. В обоих комплектах защиты срабатывают пусковые реле P_1 и P_2 и реле мощности M . Реле мощности размыкают при помощи промежуточного реле PP цепь пуска в. ч. поста. Вследствие бездействия обоих передатчиков ток высокой частоты отсутствует и блокирующие реле срабатывают, разрешая защите произвести отключение линии.

При качаниях, обычно сопровождающихся возрастанием тока и снижением напряжения, пусковые реле тока и сопротивления могут приходить в действие. Поэтому поведение защиты в этих условиях будет зависеть от поведения реле мощности, которое зависит от положения точки электрического центра качаний. Если последний окажется в пределах защищаемой линии (см. §13-2), то знаки мощности по ее концам будут положительными (т. е. направленными от шин в линию). В этом случае защита подействует неправильно и отключит линию. На всех остальных участках сети, где электрический центр расположен вне линии, направления мощ-

ности по их концам будут различными и защита будет блокироваться, как и в условиях внешних к. з.

Для предотвращения неправильных отключений применяется специальная блокировка, запрещающая работать защите при качаниях (см. § 13-3).

Пусковые реле, реагирующие на составляющие нулевой или обратной последовательностей, при качаниях, возникающих в симметричном режиме, не действуют, поэтому для таких защит блокировок от качаний не требуется.

в) Особенности пускового органа защиты

Из принципа действия защиты и работы схемы следует, что *непрерывным условием правильной работы защиты при внешних к. з. является пуск высокочастотного передатчика на ближнем к месту к. з. (т. е. приемном) конце линии.* При несогласованной чувствительности пусковых реле на противоположных концах линии это условие может быть нарушено. Так, например, если при внешнем к. з. реле Π_2 (рис. 12-9), пускающее в. ч. передатчик на приемном конце линии, не сработает из-за недостаточной чувствительности, а реле Π_1 , пускающее защиту на питающей стороне линии, окажется более чувствительным и подействует, то защита на питающем конце неправильно отключит линию из-за отсутствия блокирующего сигнала с приемного конца.

Для исключения этого пусковой орган выполняется из двух комплектов реле: одного — Π_2 для пуска высокочастотной части и второго — Π_1 в цепи отключения. При этом реле Π_2 должно быть в 1,5—2 раза чувствительнее реле Π_1 на своем и противоположном концах линии. При выполнении этого условия имеется полная гарантия, что более чувствительные реле Π_2 обеспечат пуск в. ч. передатчика, если пришли в действие более грубые пусковые реле Π_1 в цепи отключения. Такой принцип пуска предусмотрен в схеме, показанной на рис. 12-9.

Имеется и второй способ, при котором пусковой орган состоит из одного комплекта, управляющего как высокочастотной, так и релейной частями защиты. В этом случае пусковые реле на каждом конце линии пускают в. ч. пост своего комплекта и одновременно осуществляют пуск поста на противоположной стороне линии. Такой принцип пуска получил название *дистанционного*; схема его выполнения рассматривается в § 12-5.

При дистанционном пуске несогласованность в чувствительности пусковых реле на любом конце линии не представляет опасности, так как при работе одного пускового реле запускаются оба поста и блокирующий импульс с приемного конца линии будет, таким образом, обеспечен, даже если установленное там пусковое реле не подействует.

Уставки пусковых реле. Оба пусковых комплекта реле Π_1 и Π_2 должны быть отстроены от максимальной нагрузки

(если они на нее реагируют) и надежно действовать при к. з. на противоположном конце защищаемой линии. Токовые реле отстраиваются от нагрузки по формуле

$$I_{с.з.} = \frac{k_n}{k_{воз}} I_{н. макс}, \quad (12-2)$$

а реле сопротивления — по формуле

$$z_{с.з.} = \frac{1}{k_n k_{воз}} z_{раб. мин}, \quad (12-3)$$

при $\varphi_p = \varphi_{нагр}$. В обоих случаях $k_n > 1$.

Исходя из этого уставка пусковых реле Π_2 , пускающих в ч. передатчик, выбирается по выражению (12-2) или (12-3), а уставки пусковых реле Π_1 , управляющих цепью отключения, принимаются в 1,5—2 раза грубее уставок на Π_2 по соображениям, приведенным выше.

Чувствительность реле, управляющих отключением, проверяется по к. з. на противоположном конце линии, коэффициент чувствительности должен быть в худшем случае не меньше 1,5—2.

По принципу своего действия защита не реагирует на перегрузки, поскольку в этом режиме мощности по концам линии имеют разные направления, так же как и при внешнем к. з. Поэтому для повышения чувствительности можно не считаться с маловероятными или кратковременными перегрузками (например, токами самозапуска и т. п.) и отстраивать реле Π_2 от нормальной нагрузки. При этом пусковые реле Π_1 , управляющие цепью отключения, должны быть отстроены от максимальной нагрузки.

Реле, питающиеся от фильтра тока или напряжения нулевой и обратной последовательностей, на нагрузку не реагируют, но их необходимо отстраивать от небаланса, возможного в условиях нагрузки. Величину небаланса оценивают на основании данных опыта и проверяют непосредственным измерением при включении защиты.

г) Контроль исправности высокочастотного канала и передатчиков

Нарушение высокочастотного канала или неисправности в постах, в частности повреждение электронных ламп, приводят к неправильной работе защиты при внешних к. з. В связи с этим в схеме защиты предусматривается устройство контроля за исправностью высокочастотной аппаратуры. Для этой цели установлены кнопка K и миллиамперметр mA (рис. 12-9). Периодически дежурный персонал, нажимая кнопку K , пускает передатчик и по показанию миллиамперметров, установленных в выходной цепи приемников, проверяет величину тока приема на обоих концах линии. Цепь от кнопки K заводится через контакты реле ΠP , с тем чтобы проверка не препятствовала правильной работе защиты, если во

время ее проведения возникает внешнее к. з. За последнее время разработаны и применяются автоматические устройства для проверки исправности канала с пуском от часов в определенное время суток.

12-5. РАЗНОВИДНОСТИ НАПРАВЛЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ И ИХ СХЕМЫ

а) Направленная защита с высокочастотной блокировкой

Защита состоит из двух комплектов: одного от междуфазных к. з., сравнивающего направление мощности в фазах, и второго от замыканий на землю, реагирующего на знак мощности нулевой последовательности. Каждый комплект выполняется по схеме, приведенной на рис. 12-9. В комплекте от междуфазных к. з. в качестве органа мощности M служат реле мощности, включенные на ток фазы и соответствующее напряжение (по принятым схемам), а в качестве пусковых реле $П_1$ и $П_2$ используются реле, реагирующие на ток или сопротивление фазы.

Комплект от замыканий на землю выполняется при помощи реле мощности, включенного на мощность нулевой последовательности. Пусковыми реле служат токовые реле, реагирующие на ток нулевой последовательности.

При к. з. на землю предусматривается блокировка междуфазного комплекта для предупреждения неправильного действия его под влиянием токов в неповрежденных фазах. Комплект от междуфазных к. з. должен иметь блокировку от качаний, а в защитах с пуском от реле сопротивлений — и блокировку от неисправностей в цепях напряжения.

Несмотря на простоту принципа действия, полные схемы подобных защит получаются достаточно многорелейными и сложными. При этом нужно учитывать, что по своему принципу действия направленная защита с в. ч. блокировкой не реагирует на к. з. за пределами защищаемой линии, поэтому ее приходится дополнять резервными защитами, что еще больше усложняет исполнение защиты. В большинстве случаев в качестве резервной защиты используются дистанционная защита от междуфазных к. з. и ступенчатая защита нулевой последовательности от замыканий на землю.

б) Дистанционная защита в сочетании с высокочастотной блокировкой

Дистанционная защита имеет органы направления мощности (самостоятельные или в сочетании с дистанционными) и пусковые реле.

Используя эти элементы и добавляя к ним блокирующее реле и высокочастотную часть, можно получить комбинированную защиту, выполняющую функции основной и резервной защит,

с меньшим числом реле, чем в предыдущем варианте. Блокирующее реле в схеме комбинированной защиты шунтирует реле времени второй зоны, разрешая защите действовать без выдержки времени, при к. з. на защищаемой линии.

Такая комбинированная защита при помощи в. ч. блокировки обеспечивает мгновенное двустороннее отключение к. з. в пределах защищаемой линии. Комплект же дистанционной защиты позволяет отключать к. з. на шинах, резервировать защиты следующего участка, а также служит резервом при к. з. на защищаемой линии в случае отказа в. ч. блокировки или ее отсутствия.

Характеристика дистанционной защиты с в. ч. блокировкой приведена на рис. 12-10, штриховкой отмечено ускорение, достигаемое с помощью в. ч. блокировки.

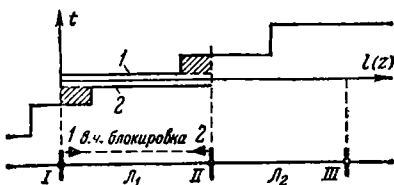


Рис. 12-10. Характеристика дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой.

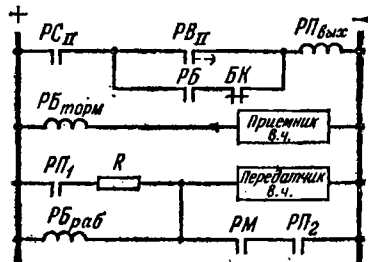


Рис. 12-11. Принципиальная схема дистанционной защиты в сочетании с высокочастотной блокировкой (для одной фазы).

Общий принцип исполнения таких схем можно уяснить из рис. 12-11.

Пусковые реле $РП_1$ и $РП_2$ и орган направления мощности $РМ$ (или направленный дистанционный орган) дистанционной защиты управляют работой в. ч. поста (генератора и приемника) и блокирующего реле $РБ$, как показано на схеме. При к. з. на защищаемой линии, когда в. ч. генераторы с обеих сторон линии остановлены, блокирующее реле $РБ$ шунтирует контакты реле времени $РВ_{II}$ второй (или третьей) зоны дистанционной защиты и она срабатывает без выдержки времени. При внешнем к. з. блокирующее реле не действует и защита работает как дистанционная, резервируя следующий участок сети с помощью второй и третьей зон.

Для предупреждения неправильной работы при качаниях цепь блокирующего реле заведена через контакты блокировки от качаний $БК$ дистанционной защиты.

По рассмотренной схеме выполняется сочетание дистанционной защиты ПЗ-158 и ПЗ-2 с в. ч. блокировкой. В качестве чувствительного пускового реле $РП_1$, пускового в. ч. генератора, используются пусковые реле блокировки от качаний, реагирующей на появление I_2 и I_0 или U_2 и U_0 . Органом, контролирующим направление мощности $РМ$, служат направленные дистанционные реле третьей зоны. Одновременно эти реле выполняют функции в-

рого (более грубого) пускового реле $РП_2$, пускающего блокирующее реле $РВ$ и замыкающего цепь останова в. ч. генератора.

Для осуществления в. ч. блокировки панель дистанционной защиты дополняется приставкой, которая содержит блокирующее реле $РБ$.

Поскольку дистанционная защита используется в Советском Союзе только как защита от междуфазных к. з., необходимо предусматривать аналогичное сочетание резервной защиты нулевой последовательности с в. ч. блокировкой. Полная схема подобной защиты дана на рис. 12-12. Жирными линиями показаны дополнения, обусловленные в. ч. блокировкой.

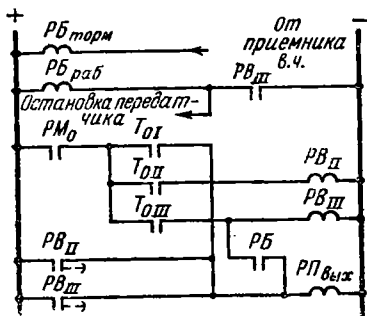


Рис. 12-12. Принципиальная схема направленной защиты нулевой последовательности в сочетании с высокочастотной блокировкой.

Преимущество комбинированного исполнения направленной в. ч. защиты с резервной заключается в уменьшении числа реле, на что уже указывалось выше. Недостатком совмещения резервной и основной защит является отсутствие взаимного резервирования между ними, имеющее место при раздельном исполнении.

в) Фильтровая направленная защита с высокочастотной блокировкой

В фильтровых защитах орган направления мощности и орган пуска реагируют на составляющие обратной последовательности. Такое исполнение защиты дает ряд преимуществ.

Фильтровые защиты получают односторонними (с одним реагирующим органом на три фазы), они не реагируют на нагрузку и качания в симметричных режимах и обладают высокой чувствительностью. В СССР разработаны фильтровые защиты от несимметричных к. з. и от всех видов повреждений.

Фильтровые защиты от несимметричных повреждений отличаются особой простотой. Они могут выполняться с одним реле мощности, совмещающим в себе функции органа мощности и органа пуска. На рис. 12-13 представлена схема с реле мощности $М$ двустороннего действия. Реле $М$ включено на ток и напряжение обратной последовательности через соответствующие фильтры. Вторым элементом схемы является блокирующее реле $РБ$, действующее, как и в предыдущих схемах. При внешнем к. з. реле мощности на приемном конце линии замыкает контакты 2 и пускает в. ч. генератор, который посылает блокирующий импульс на питающий конец линии, где реле мощности $М$ замыкает контакт 1. Блокирующее реле $РБ$ не позволяет защите работать на отключение.

При к. з. в зоне реле мощности на обоих концах линии замыкают контакты I , в. ч. генераторы бездействуют и реле $PБ$ срабатывает на отключение с обеих сторон линии.

При симметричных к. з. защита не действует. Для устранения этого дефекта защиту можно дополнить комплектом от трехфазных к. з.

Фильтровая защита от всех видов к. з. Известно два варианта ее исполнения: с реле мощности обратной последовательности, переключаемым при симметричных к. з. на мощность фазы, и с трехфазным быстродействующим реле мощности обратной последовательности, реагирующим и при симметричных к. з. на мощность S_2 , возникающую в начале к. з. Последний вариант разработан ВНИИЭ для линий 750 кВ.

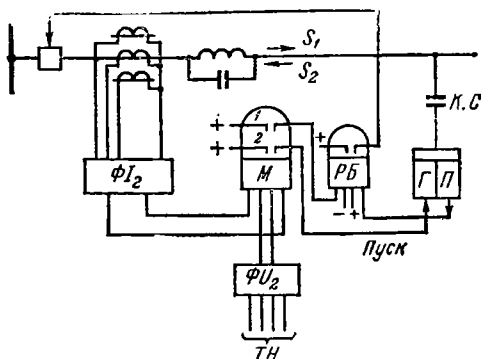


Рис. 12-13. Фильтровая направленная высокочастотная защита с двусторонним реле мощности.

Защита по первому варианту основана на следующих принципах [Л. 23]:

1. В качестве органа направления мощности используется одно реле, включенное на мощность обратной последовательности, которое при трехфазных к. з. переключается пусковым органом на фазный ток и линейное напряжение.

2. Пуск релейной и в. ч. частей защиты осуществляется одним реле при всех видах к. з. Это реле реагирует на появление U_2 или I_2 . Чтобы обеспечить действие защиты при трехфазных к. з., пусковой орган фиксирует (запоминает) на некоторое время появление кратковременной несимметрии, возникающей в начале трехфазного повреждения. Схема пускового органа с фиксацией кратковременного действия пускового реле H_2 приведена на рис. 12-14.

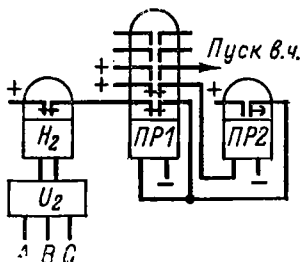


Рис. 12-14. Принципиальная схема пускового органа фильтровой высокочастотной защиты.

отпадает, производя пуск защиты. Одновременно реле $ПР1$ замыкает цепь своей обмотки и вследствие этого не может возвратиться в исходное положение до тех пор, пока в его обмотку не будет подан ток контактами реле $ПР2$. Как видно из схемы (рис. 12-14), нормально реле $ПР2$ питается током и находится в подтянутом состоянии. При действии $ПР1$ ток в реле прерывается и оно отпадает с выдержкой времени порядка 0,3—0,5 с, при этом контакт $ПР2$ замыкается и подает ток в реле $ПР1$, возвращая его в нормальное положение. Благодаря особенностям схемы пуска $ПР1$, оно отзывывается на любое кратковременное действие реле H_2 , фиксируя появление U_2 в начальный

момент трехфазного к. з. на время (0,3—0,5 с), достаточное для действия защиты.

При двухфазных и однофазных повреждениях U_2 появляется на все время к. з., действие схемы в этом случае понятно из чертежа (рис. 12-14).

3. Дистанционный пуск генератора в. ч. При действии пускового реле на одном конце линии с помощью специальной схемы (рис. 12-15, а) производится дистанционный пуск генератора высокой частоты на противоположной стороне. Дистанционный пуск осуществляется с помощью промежуточного реле $РП1$, включенного на ток $I_{бл}$ приемника высокой частоты $П$, и второго вспомогательного реле $РП2$ для возврата схемы. При пуске генератора на противоположном конце

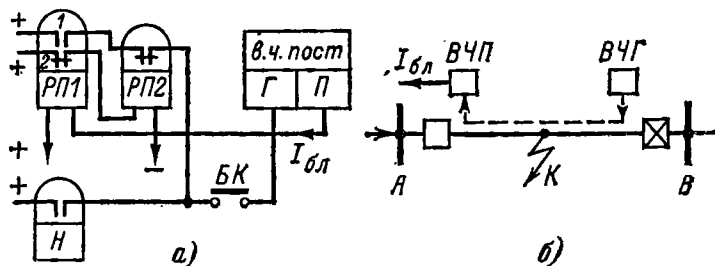


Рис. 12-15. Дистанционный пуск передатчика на противоположном конце линии.

а — схема; б — возможность отказа защиты при одностороннем питании.

линии приемник данной стороны принимает высокочастотный сигнал и дает ток в реле $РП1$. Последнее срабатывает и контактом I пускает генератор $Г$ на данном конце линии. При этом реле $РП1$ получает питание от этого же генератора и поэтому само по себе не может возвратиться в исходное положение. Для возврата реле $РП1$ и прекращения пуска генератора служит реле $РП2$. Оно срабатывает (отпадает) при действии реле $РП1$ и размыкает с замедлением порядка 0,4 с цепь пуска генератора.

Дистанционный пуск может привести к отказу защиты при одностороннем питании поврежденной линии (рис. 12-15, б), если к. з. на приемном конце линии $В$ отключается раньше, чем на питающем $А$, или если линия в момент повреждения находилась под напряжением. В этих случаях генератор в. ч. на приемном (отключенном) конце линии, запущенный дистанционно, посылает импульс в. ч., блокирующий защиту на питающем конце, не давая ей работать. Для исключения этого недостатка цепь пуска генератора заведена через блок-контакты $БК$ выключателя (рис. 12-15, а). При отключении выключателя блок-контакты размыкаются и возможность пуска в. ч. генератора исключается.

12-6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия

Дифференциально-фазная высокочастотная защита основана на сравнении фаз тока по концам защищаемой линии.

Считая положительными токи, направленные от шин в линию, находим, что при внешних к. з. в точке K_1 (рис. 12-16, а) токи I_m и I_n по концам защищаемой линии имеют различные знаки и, следовательно, их можно считать сдвинутыми по фазе на 180° .

В случае же к. з. на защищаемой линии (рис. 12-16, б) токи на ее концах имеют одинаковые знаки и их можно принять совпадающими по фазе, если пренебречь сдвигом векторов э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ по концам электропередачи и различием углов полных сопротивлений z_m и z_n .

Таким образом, сравнивая фазы токов по концам линии, можно установить местоположение к. з. В обычных схемах дифференциальных защит сравнение фаз токов осуществляется в дифференциальных реле путем непосредственного сравнения токов, проходящих в начале и конце линии; в дифференциально-фазовой в. ч. защите сравнение фаз осуществляется косвенным путем посредством токов высокой частоты.

Упрощенная схема, иллюстрирующая работу дифференциально-фазовой защиты, и диаграмма, поясняющая принцип ее действия, приведены на рис. 12-17 и 12-18.

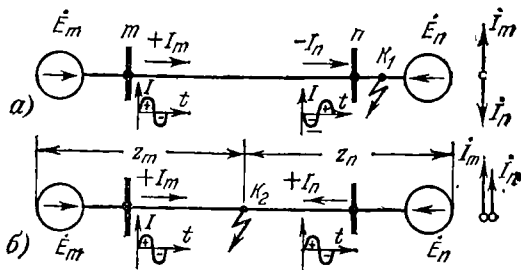


Рис. 12-16. Принцип действия дифференциально-фазовой высокочастотной защиты.

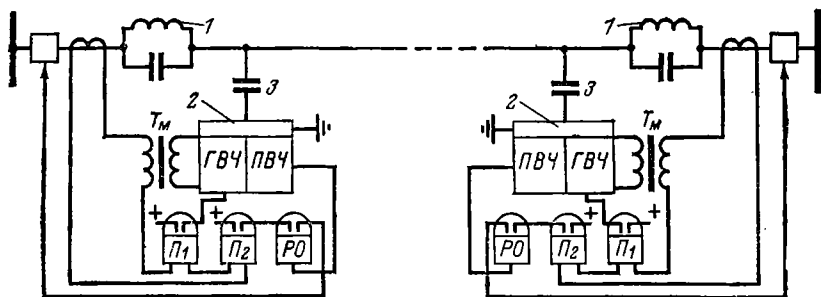


Рис. 12-17. Упрощенная принципиальная схема дифференциально-фазовой высокочастотной защиты.

Защита состоит из приемопередатчика, включающего в себя в. ч. генератор ГВЧ, приемник ПВЧ, реле отключения РО, питающегося током приемника, и двух пусковых реле Π_1 и Π_2 , одно из которых пускает ГВЧ, а второе контролирует цепь отключения защиты. Токи высокой частоты передаются по каналу, образованному проводом линии высокого напряжения и землей. Выход токов в. ч. за пределы линии ограничивается заградителями 1, подключение в. ч. постов 2 осуществляется через конденсаторы связи 3.

Особенность защиты заключается в том, что в. ч. генератор управляется (манипулируется) непосредственно

токами промышленной частоты при помощи специального трансформатора T_M . Генератор включен так, что при положительной полуволне промышленного тока он работает, посылая в линию ток высокой частоты, а при отрицательной — запирается и ток высокой

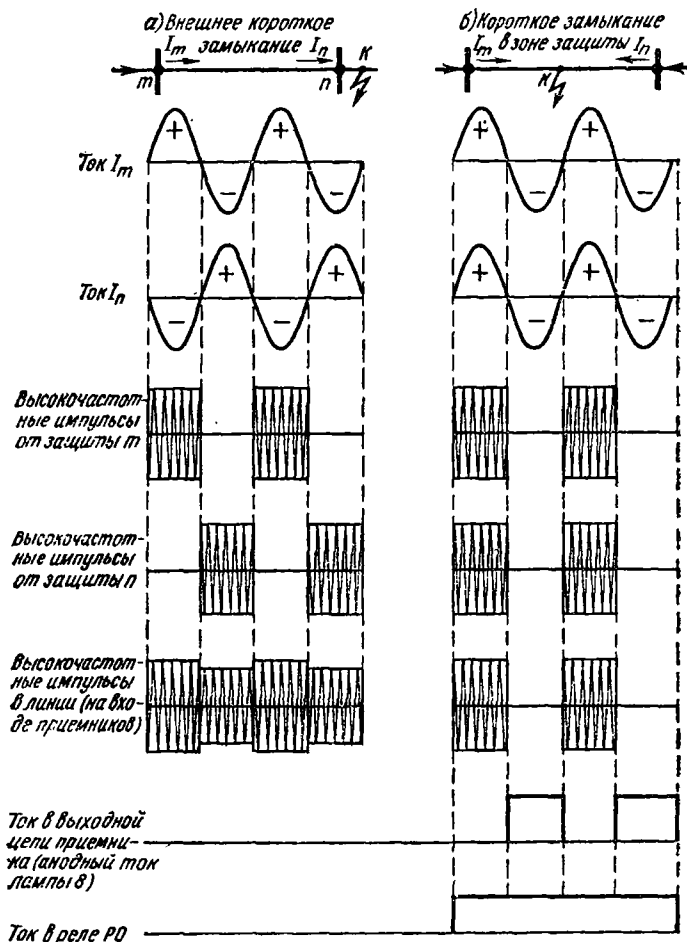


Рис. 12-18. Диаграмма токов в дифференциально-фазной высокочастотной защите.

частоты прекращается. В то же время приемник выполнен таким образом, что при наличии токов высокой частоты, поступающих в его входной контур, выходной ток, питающий реле PO , равен нулю, а при отсутствии в. ч. сигнала появляется выходной ток, который поступает в реле PO . Таким образом, генератор высокой частоты работает только в течение положительных полупериодов

тока промышленной частоты, а приемник — при отсутствии в ч. сигналов.

При внешнем к. з. (рис. 12-18, а), когда фазы первичных токов по концам линии противоположны, генератор на конце линии *т* работает в течение первого полупериода промышленного тока, а на конце *п* — в течение следующего полупериода. Ток высокой частоты протекает по линии непрерывно и питает приемники на обеих сторонах линии. В результате этого выходной ток в цепи приемника и реле *РО* отсутствует, и реле (защита) не работает.

При к. з. в зоне (рис. 12-18, б) генераторы на обоих концах линии работают одновременно, поскольку фазы токов по концам линии совпадают. Высокочастотный ток, поступающий при этом в приемники, будет иметь прерывистый характер с интервалами времени, равными полупериоду промышленного тока. В этом случае приемник работает в промежутки времени, когда ток высокой частоты отсутствует, и заперт (не работает) во время его прохождения. В выходной цепи приемника появляется прерывистый ток, который сглаживается специальным устройством и подается в реле *РО*. Последнее срабатывает и отключает линию.

Таким образом, сдвиг фаз между токами, проходящими по обоим концам линии, определяется по характеру в. ч. сигналов (с п л о ш н ы е и л и п р е р ы в и с т ы е), на которые при помощи приемника реагирует реле *РО*.

По принципу своего действия дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку и качания, так как в этих режимах токи на обоих концах линии имеют разные знаки.

б) Основные органы дифференциально-фазной защиты и особенности их выполнения

Дифференциально-фазная защита состоит (рис. 12-17) из трех основных элементов: п у с к о в о г о о р г а н а I_1 и I_2 , пускающего передатчик и разрешающего действовать защите при к. з.; о р г а н а м а н и п у л ь ц и и, управляющего (с помощью T_m) передатчиком токов высокой частоты в зависимости от знака сравниваемых токов, и о р г а н а с р а в н е н и я фаз токов, действующего на отключение при совпадении фаз токов, проходящих по концам линии.

Дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку, поэтому пусковой орган в схемах этой защиты не является обязательным. Однако при его отсутствии любое нарушение непрерывной циркуляции токов высокой частоты будет приводить к срабатыванию реле *РО* и ложному отключению линии. Поэтому во всех схемах, дифференциально-фазной защиты применяются пусковые реле, отстроенные от токов нагрузки.

К особенностям выполнения органов защиты относятся:

1) одновременный пуск в. ч. передатчиков на обоих концах защищаемой линии при внешних к. з.

При удаленных внешних к. з., когда пусковые реле, пускающие в. ч. передатчик, работают на пределе своей чувствительности, возможна работа пускового органа только с одной стороны линии. Тогда ток высокой частоты будет прерывистым и защита подействует ложно. Для исключения этого пусковой орган защиты выполняется из двух комплектов: одного — чувствительного, пускающего высокочастотный передатчик, и второго — более грубого (в 1,5—2 раза), управляющего цепью отключения.

2) Нарушение непрерывности высокочастотного сигнала при внешних к. з. и качаниях может возникнуть также вследствие неодновременного действия реле, пускающих передатчики, установленных на противоположных концах линии. Поэтому пуск в. ч. передатчиков при внешних к. з. должен осуществляться несколько раньше, чем срабатывает реле PO , замыкающее цепь отключения защиты, а останов их должен происходить несколько позже возврата пусковых реле, управляющих цепью отключения¹.

3) Выполнение дифференциально-фазных защит, сравнивающих токи в каждой фазе, получается весьма сложным и дорогим.

Защита значительно упрощается и становится более надежной, если вместо токов фаз сравнивать их симметричные составляющие, получаемые от фильтров, преобразующих трехфазную систему токов в однофазную. В качестве фильтра в защитах этого типа используются комбинированные фильтры, на выходе которых получается ток $\dot{I}_f$, пропорциональный $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$.

Подобные фильтры обеспечивают действие защиты при всех видах к. з.

В случае симметричных к. з. ток фильтра обуславливается составляющей I_1 , а при несимметричных к. з. — составляющими I_1 и I_2 или I_1 и I_0 .

в) Искажение фаз сравниваемых токов (фазовые погрешности)

При рассмотрении принципа действия защиты предполагалось, что при внешних к. з. токи I_m и I_n по концам защищаемой линии сдвинуты по фазе на угол $\psi = 180$, а при к. з. в зоне — совпадают по фазе, т. е. $\psi = 0$ (рис. 12-16 и 12-18).

В действительности из-за погрешности трансформаторов тока и ряда других причин (отмечаемых дальше) фазы вторичных токов искажаются, и поэтому сдвиг фаз ψ между токами на обоих концах линии отличается от указанных выше значений. При больших искажениях фаз токов I_m и I_n возможны неправильные действия защиты при внешних к. з. и отказ в работе — при к. з. в зоне. В связи с этим параметры защиты выбираются так, чтобы она блокировалась в условиях внешнего к. з. при $\psi = 180 - \beta$ и рабо-

¹ При к. з. в зоне передатчик на отключившемся конце линии должен немедленно останавливаться для предупреждения блокировки защиты противоположной стороны.

тала при к. з. в зоне при $\psi > 0$. Предельное значение угла β , при котором защита должна блокироваться, называется углом блокировки защиты (см. рис. 12-26). Для уменьшения искажений фаз I_m и I_n трансформаторы тока, питающие дифференциально-фазную защиту, должны выбираться по 10%-ным характеристикам, при этом угловая погрешность каждого трансформатора тока не будет превышать 7%.

При к. з. в зоне кроме погрешности трансформаторов тока, искажающих фазы токов, имеется расхождение фаз первичных токов $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ вследствие различия фаз между э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ эквивалентных генераторов (рис. 12-19, а); разницы углов полных

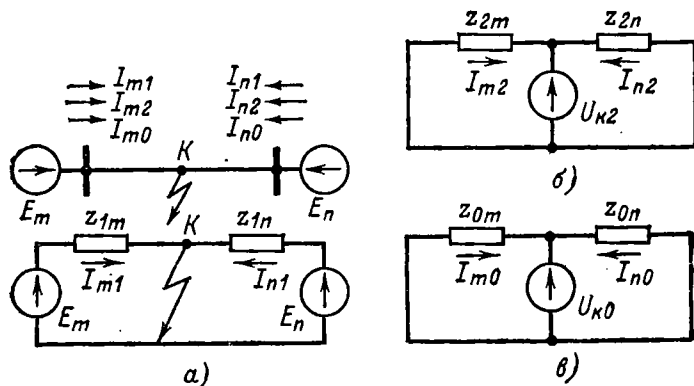


Рис. 12-19. Схемы замещения симметричных составляющих.

а — прямой; б — обратной и в — нулевой последовательностей.

сопротивлений z_m и z_n в схемах замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 12-19, а, б, в) и наложения токов нагрузки на токи к. з.

Токи прямой последовательности (рис. 12-19, а) $\dot{I}_{m1} = \frac{\dot{E}_m}{z_{1m}}$, а $\dot{I}_{n1} = \frac{\dot{E}_n}{z_{1n}}$. Их фазы зависят от фаз э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$. С учетом их различия, а также влияния нагрузки и несовпадения углов z_{1m} и z_{1n} сдвиг фаз ψ_1 между I_{1m} и I_{1n} отличается от нуля $\psi_1 \neq 0$.

Фазы токов обратной и нулевой последовательности на обоих концах линии определяются одним и тем же напряжением в месте к. з. ($\dot{U}_{K2}$ или $\dot{U}_{K0}$), расхождение фаз $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ на эти составляющие не влияет.

Искажение, обусловленное различием углов сопротивлений, не велико, поэтому практически токи I_{2m} и I_{2n} , а также I_{0m} и I_{0n} можно считать совпадающими по фазе.

Таким образом, сдвиг фаз между сравниваемыми токами $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$ на каждом конце линии определяется в основ-

Исследования показали, что r_d зависит от протяженности дуги l_R и величины тока к. з. I_R в электрической дуге:

$$r_{\text{D}} = k \frac{l_{\text{R}}}{J''}. \quad (11-16)$$

С учетом этого сопротивление r_d при к. з. в начале линии будет меньше, чем в конце, поскольку ток к. з. I_n в первом случае всегда больше, чем во втором.

в) Характеристики срабатывания реле

Х а р а к т е р и с т и к и с р а б а т ы в а н и я основных типов реле минимального сопротивления изображены на рис. 11-7. Характеристики каждого реле представляют собой геометрическое

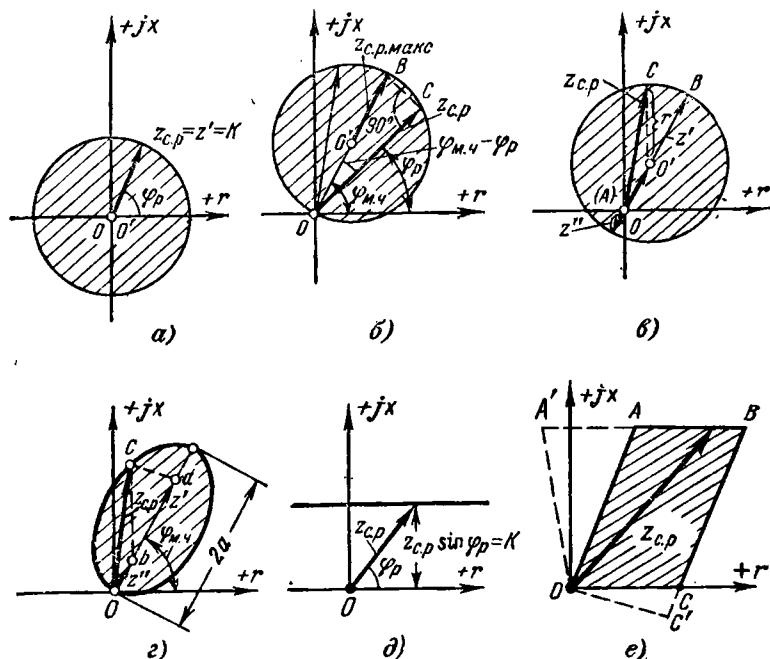


Рис. 11-7. Характеристики срабатывания реле сопротивления.

место точек, удовлетворяющих условию $z_p = z_{c.p.}$. Заштрихованная часть характеристики, где $z_p < z_{c.p.}$, соответствует области действия реле. При z_p , выходящих за пределы заштрихованной части, т. е. при $z_p > z_{c.p.}$, реле не работает. Таким образом, *характеристика работы реле является пограничной кривой, определяющей условия действия реле*. Эту характеристику можно рассматривать как зависимость величины (модуля) вектора сопротивления сраба-

тивания реле $z_{с.р}$ от угла φ_p , определяющего его направление, и представлять в виде уравнения $z_{с.р} = f(\varphi_p)$.

Характеристика срабатывания реле должна обеспечивать работу реле при к. з. в пределах принятой зоны действия (z'). С учетом сопротивления электрической дуги вектор $z_p = z_k + r_d$ может располагаться при к. з. на защищаемом участке линии в пределах площади четырехугольника $ОКК'K''$, показанного на рис. 11-6, д. Действие реле при к. з. будет обеспечено, если характеристики срабатывания реле, показанные на рис. 11-7, будут охватывать область комплексной плоскости, в которой может находиться вектор сопротивления z_p при к. з. на линии (площадь $ОКК'K''$ на рис. 11-6, д).

На рис. 11-7 приводятся наиболее распространенные характеристики реле, изображаемые в осях x, y в виде окружности, эллипса, прямой линии, многоугольника.

Ненаправленное реле полного сопротивления (рис. 11-7, а). Уравнение срабатывания реле

$$z_{с.р} = K, \quad (11-2)$$

где K — постоянная величина.

Характеристика этого реле имеет вид окружности с центром в начале координат и радиусом, равным K . Реле работает при $z_p \leq K$, при любых углах φ_p между вектором z_p и осью r . Зона действия реле расположена в четырех квадрантах, в том числе в первом и третьем. Последнее означает, что реле с характеристикой (11-2) работает как **ненаправленное** реле сопротивления.

Направленное реле полного сопротивления имеет $z_{с.р}'$, зависящее от угла φ_p (рис. 11-7, б). Его характеристика срабатывания изображается окружностью, проходящей через начало координат. Сопротивление срабатывания имеет максимальное значение при

$$\varphi_p = \varphi_{м.ч},$$

где $\varphi_{м.ч}$ — угол максимальной чувствительности реле, при котором $z_{с.р} = z_{с.р.макс}$, т. е. равен диаметру окружности $ОВ$.

Зависимость срабатывания этого реле от угла φ_p может быть представлена уравнением

$$z_{с.р} = z_{с.р.макс} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_p). \quad (11-3)$$

Оно легко получается из рассмотрения треугольника $ОВС$ на рис. 11-7, б. Реле не работает при z_p , расположенных в третьем квадранте. Это означает, что оно не может действовать, если мощность направлена к шинам подстанции. Следовательно, рассмотренное реле является **направленным**.

Реле со смещенной круговой характеристикой (рис. 11-7, в). Характеристика реле смещена относительно оси координат в третий квадрант на величину z'' . Поэтому реле не только работает на защищаемой линии, но и захватывает шины A , питающие линию,

и часть длины отходящих от них присоединений. Уравнение смещенной характеристики имеет вид:

$$\left| \frac{z' - z''}{2} \right| - \left| z_{c.p} - \frac{z' + z''}{2} \right| = 0. \quad (11-4)$$

Уравнение (11-4) можно получить из рассмотрения треугольника $OO'C$. Как видно из чертежа, геометрическая разность вектора $z' - z''$ равна диаметру окружности, отсюда

$$\left| \frac{z' - z''}{2} \right| = r. \quad (11-4a)$$

Из того же чертежа видно, что $\frac{z' + z''}{2} = \overline{OO'}$, с учетом этого

$$\left| z_{c.p} - \frac{z' + z''}{2} \right| = |\overline{OC} - \overline{OO'}| = \overline{O'C} = r, \quad (11-4b)$$

где C — любая точка окружности; r — радиус окружности.

Приравнивая левые части уравнений (11-4a) и (11-4b), получаем (11-4).

Реле с эллиптической характеристикой. На рис. 11-7, а изображена характеристика направленного реле, имеющая вид эллипса. Сопротивление срабатывания $z_{c.p}$ такого реле зависит от угла φ_p и имеет наибольшее значение при $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$. Угол $\varphi_{м.ч}$ обычно принимается равным $\varphi_{л}$. Сопротивление $z_{c.p, макс}$ равно большей оси эллипса $2a$.

Как известно, эллипс является геометрическим местом точек, сумма расстояний которых до фокусов b и d постоянна и равна большей оси $2a$. На основании этого, обозначая координаты фокусов b и d , z'' и z' , а координаты любой точки C эллипса $z_{c.p}$, получаем уравнение эллиптической характеристики

$$|z_{c.p} - z'| + |z_{c.p} - z''| = 2a. \quad (11-5)$$

Зона действия реле заштрихована. По сравнению с круговой характеристикой эллиптическая характеристика имеет меньшую рабочую область. Это дает возможность лучше отстроить реле от качаний и перегрузок.

Реле реактивного сопротивления срабатывает при

$$x_p = z_{c.p} \sin \varphi_p = x_{c.p} = K,$$

где $x_{c.p}$ — постоянная величина, не зависящая от φ_p .

Характеристика таких реле изображается прямой линией, параллельной оси r (рис. 11-7, б), отстоящей от нее на расстоянии $x_{c.p} = K$.

Реле с характеристикой в виде многоугольника. Подобная характеристика направленных реле сопротивлений показана на рис. 11-7, в. Сопоставляя эту характеристику с площадью $OKK'K''$ на рис. 11-6, б, можно установить, что четырехугольная характеристика реле в большей мере, чем другие характеристики, совпа-

дает с контуром области расположения векторов $\mathbf{z}_p$ при к. з. и является, с этой точки зрения, наиболее рациональной.

Реле с характеристикой в виде многоугольника сложнее в конструктивном отношении и имеют пока ограниченное применение.

Пунктиром показан вариант характеристики подобных же реле в виде многоугольника $OA'BC'$. Такое расширение зоны реле предусматривается для обеспечения его действия при двустороннем питании к. з. через переходное сопротивление r_d .

11-5. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИХ КОНСТРУКЦИЯМ

Дистанционные реле могут выполняться на различных принципах (см. § 2-4). До последнего времени значительное распространение имеют электромеханические конструкции на электромагнитном и особенно индукционном принципе. За последние годы разработаны и внедряются реле с использованием полупроводниковых приборов. Реле сопротивления на полупроводниках обладают существенными преимуществами, отмеченными в § 2-14, и постепенно вытесняют электромеханические конструкции. Отечественная промышленность переходит на выпуск реле сопротивлений только на выпрямленном токе с полупроводниковыми приборами.

Принцип действия всех разновидностей реле сопротивления основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, являющихся функциями тока и напряжения сети $\dot{I}_p$ и $\dot{U}_p$ по выражениям (2-38). В общем случае

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I &= k_1 \dot{U}_p + k_2 \dot{I}_p; \\ \dot{U}_{II} &= k_3 \dot{U}_p + k_4 \dot{I}_p. \end{aligned} \right\} \quad (11-6)$$

В электромеханических конструкциях сравнение $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ осуществляется тремя способами: механическим — путем сравнения электромагнитных моментов $M_{эI}$ и $M_{эII}$, пропорциональных соответственно U_I^2 и U_{II}^2 ; электрическим — непосредственным сравнением $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ и магнитным — путем сопоставления магнитного потока $\Phi_I \equiv U_I$ с потоком $\Phi_{II} \equiv U_{II}$.

В реле на полупроводниках напряжения U_I и U_{II} сравниваются с помощью схем сравнения, рассмотренных в § 2-16.

Меняя коэффициенты k в выражениях (11-6), можно получать реле сопротивления с различными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, а — г.

Для получения реле с более сложными характеристиками, изображенными на рис. 11-7, г, е и другими разновидностями используется сравнение трех и более электрических величин, также являющихся линейными функциями I_p и U_p .

Основные требования к параметрам реле сопротивления сводятся к следующему:

1. Реле сопротивления должны быть быстродействующими, чтобы обеспечить быстрое отключение к. з. в пределах первой зоны. Для этого в сетях 110—500 кВ необходимо иметь время действия реле $t_p = 0,02 \div 0,05$ с.

2. Реле сопротивления, выполняющие функции дистанционных органов, должны отличаться точностью $z_{c.p}$ с тем, чтобы зоны действия защит были стабильными. Погрешность в отклонении величины $z_{c.p}$ от заданной установки z_y не должна превышать 10%.

3. Пусковые реле сопротивления должны иметь высокий коэффициент возврата:

$$k_v = \frac{z_v}{z_{c.p}} = 1,05 \div 1,15.$$

11-6. РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ВЫПРЯМЛЕННОМ ТОКЕ, ВЫПОЛНЯЕМЫЕ С ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

а) Общие принципы выполнения реле

Реле сопротивления на выпрямленном токе отличаются простотой схемы, малым потреблением мощности и позволяют получать характеристики срабатывания различного вида (окружность, эллипс и др.).

Принцип действия этих реле основан на сравнении абсолютных величин двух напряжений U_I и U_{II} , являющихся в общем случае функцией напряжения и тока сети (U_p и I_p) согласно (11-6). Для получения реле сопротивления в уравнениях (11-6), определяющих значение U_I и U_{II} , необходимо принять коэффициент $k_3 = 0$, $k_2 < 0$, а k_1 и $k_4 > 0$. Тогда подлежащие сравнению напряжения будут связаны с U_p и I_p следующими выражениями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_I &= k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p; \\ \dot{U}_{II} &= k_4 \dot{I}_p. \end{aligned} \right\} \quad (11-7)$$

Сравнение указанных величин U_I и U_{II} производится так же, как и в схемах реле мощности, — непосредственным вычитанием одной величины из другой. Для устранения влияния сдвига фаз сравниваемые напряжения выпрямляются, а затем выпрямленные величины $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$, пропорциональные средним значениям U_I и U_{II} , вычитаются друг из друга по схемам, рассмотренным в § 2-11.

Типовая блок-схема реле сопротивления на сравнении абсолютных значений двух напряжений приведена на рис. 11-8.

Реле состоит из преобразующих (суммирующих) устройств 1 и 2, выпрямителей на полупроводниковых диодах 3 и 4, схемы

сравнения 5 и реагирующего исполнительного органа (нуль-индикатора) 6.

К входным зажимам реле подводятся напряжение и ток сети U_p и I_p . В суммирующих устройствах 1 и 2 напряжение U_p преобразуется с помощью трансформатора в напряжение $k_1 \dot{U}_p$, а ток I_p посредством трансреактора превращается в два напряжения $k_2 \dot{I}_p$ и $k_4 \dot{I}_p$. Преобразованные величины суммируются согласно (11-7), в результате чего на выходе сумматора образуются два напряжения:

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p.$$

Каждое из них выпрямляется с помощью выпрямителей 3 и 4, и полученные абсолютные значения $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ на выходе выпрямителей (или пропорциональные им токи $|I_I|$ и $|I_{II}|$) подводятся к схеме сравнения 5, где вычитаются друг из друга. На выходе схемы сравнения образуется напряжение $U_{\text{вых}} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|$ или ток $I_{\text{вых}} = |I_{II}| - |I_I|$, которые подводят к исполнительному (реагирующему) органу 6, обладающему направленностью, т. е. действующему только при определенном (положительном) знаке подведенного к нему напряжения или тока.

Полярность включения исполнительного органа подбирается с таким расчетом, чтобы он работал при $U_{II} > U_I$ и не действовал, если $U_{II} < U_I$. Напряжение U_{II} называется р а б о ч и м, а U_I — т о р м о з н ы м, так как под влиянием U_{II} исполнительный орган приходит в действие, а от U_I — не работает. При выбранной функциональной связи сравниваемых напряжений с U_p и I_p по выражениям (11-7) относительное значение величин U_I и U_{II} , а следовательно, и поведение реле зависят от соотношения U_p и I_p или, иначе говоря, от $Z_p = U_p/I_p$.

В н о р м а л ь н о м р е ж и м е напряжение U_p близко к номинальному, а ток I_p относительно невелик, поэтому $U_I = |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|$ превосходит $U_{II} = |k_4 \dot{I}_p|$ и реле не работает. П р и к. з. в з о н е действия защиты ток I_p возрастает, а напряжение U_p снижается, в результате этого U_{II} становится больше U_I и реле приходит в действие.

Исполнительный орган может выполняться в трех вариантах, рассмотренных в § 2-16:

1) с помощью поляризованного или магнитоэлектрического реле, непосредственно подключенного к зажимам m и n ;

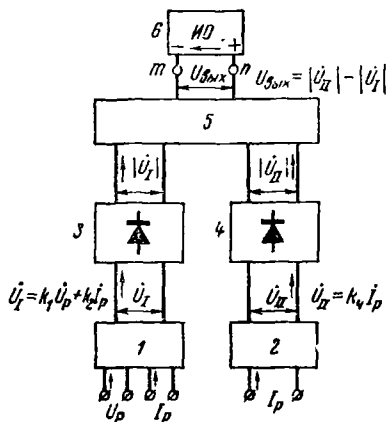


Рис. 11-8. Блок-схема сопротивления на выпрямленном токе.

2) с помощью тех же реле, включаемых через усилитель на полупроводниках (рис. 2-49, § 2-16), работающий в качестве нуль-индикатора, т. е. реагирующий на знак сигнала;

3) с помощью триггера (бесконтактного реле) на полупроводниках, на выходе которого появляется напряжение в зависимости от знака сигнала.

Общие положения о выполнении исполнительного органа и остальных элементов блок-схемы были рассмотрены в § 2-16.

Если принять в (11-7) $k_2 = 0$, то $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p$ и $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$; в этом случае реле имеет характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат. Приняв в (11-7) $k_2 = k_4$ получим реле с характеристикой в виде окружности, проходящей через начало координат. При $k_2 \neq k_4$ характеристика имеет вид окружности, смещенной относительно начала координат.

Таким образом, различные виды реле с помощью простого изменения рассмотренной конструкции можно получить, изменяя зависимости сравниваемых напряжений U_I и U_{II} от U_p и I_p без принципиальных изменений схемы реле.

Рассмотрим в качестве примера конкретные схемы направленного и ненаправленного реле сопротивления.

б) Ненаправленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Устройство и принцип действия реле. Два варианта реле со схемой сравнения на балансе токов и на балансе напряжений в упрощенном виде показаны на рис. 11-9.

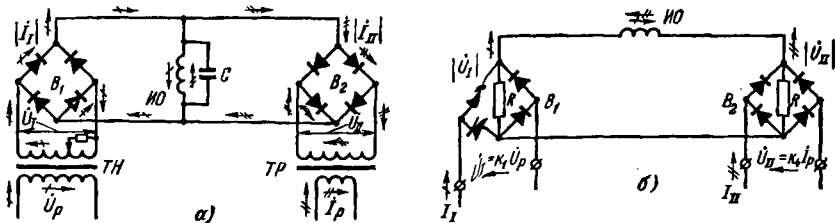


Рис. 11-9. Ненаправленное реле сопротивления, выполненное с помощью схем сравнения.

а — на балансе токов; б — на балансе напряжений.

Чтобы получить характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат, к схеме сравнения реле подводятся два напряжения:

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p. \quad (11-8)$$

Эти напряжения получают путем преобразования U_p и I_p , которые, как показано на рис. 11-9, а, подаются на входные зажимы реле.

С помощью вспомогательного трансформатора напряжения $TН$ U_p превращается в $U_I = k_1 \dot{U}_p$, а ток I_p с помощью трансреактора $ТР$ преобразуется в напряжение $\dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p$. Полученные таким образом напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ подводятся к выпрямителям B_1 и B_2 , выполненным по двухполупериодной схеме на полупроводниковых диодах.

Под действием напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ возникают пропорциональные им токи $\dot{I}_I = k' \dot{U}_p$ и $\dot{I}_{II} = k'' \dot{I}_p$, которые выпрямляются выпрямителями и замыкаются через реагирующее реле (орган) $ИО$. Токораспределение токов I_I и I_{II} показано на рис. 11-9, а и б. В схеме сравнения на балансе токов реле $ИО$ (рис. 11-9, а) включается параллельно выпрямителям на разность выпрямленных токов. В этом случае ток в $ИО$ $\dot{I}_p = |\dot{I}_{II}| - |\dot{I}_I|$.

Как уже отмечалось, реагирующий орган выполняется с помощью направленного реле постоянного тока. Он работает, если $|\dot{I}_{II}| > |\dot{I}_I|$, и не действует, если $|\dot{I}_{II}| < |\dot{I}_I|$.

Аналогично этому в схеме сравнения на балансе напряжений (рис. 11-9, б) реле $ИО$ работает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$; и не действует, если $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

Условием начала действия реле является равенство $|\dot{I}_{II}| = |\dot{I}_I|$ или $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$; первое для схемы на балансе токов, второе — на балансе напряжений.

Выражая токи и напряжения через U_p и I_p с учетом (11-28), получаем уравнения начала срабатывания для обоих реле:

$$|k_4 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p|. \quad (11-9)$$

Разделив обе части равенства на $k_1 I_p$, найдем z_p , при котором реле начнет действовать:

$$z_p = z_{c.p} = \frac{|\dot{U}_p|}{|\dot{I}_p|} = \frac{k_4}{k_1} = |z'| = \text{const}. \quad (11-10)$$

Выражение (11-10) показывает, что реле будет работать при сопротивлении $z_p \leq z_{c.p}$; величина $z'_{c.p}$ определяется отношением k_4/k_1 , которое можно рассматривать как абсолютное значение сопротивления зоны $|z'|$. Это означает, что реле работает при любом z_p , модуль которого равен $|z'|$, независимо от его угла и знака.

Таким образом, рассмотренное реле действительно является ненаправленным реле сопротивления, имеющим характеристику срабатывания в виде окружности с центром в начале координат и радиусом, равным $|z'| = k_4/k_1$ (см. рис. 11-7, а).

Сопротивление срабатывания $z_{c.p}$ регулируется изменением k_4 и k_1 , т. е. изменением коэффициентов трансформации $TН$ и $ТР$.

Зависимость $z_{c.p}$ от тока I_p . Условия срабатывания (11-9) являются идеальными, они не учитывают конечной чувствительности исполнительного органа (нуль-индикатора) $ИО$.

В действительности для срабатывания реле необходимо приложить определенное избыточное напряжение U_0 для преодоления механических сил сопротивления подвижной системы исполнительного органа или создания напряжения, необходимого для начала работы бесконтактной релейной схемы на транзисторах (триггера).

С учетом этого для срабатывания реле необходимо выполнить условие

$$|k_4 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p| + |\dot{U}_0|. \quad (11-11)$$

Разделив все члены равенства на $|k_1 \dot{I}_p|$ и сделав преобразования, получим:

$$z_{c.p} = \frac{k_4}{k_1} - \frac{|\dot{U}_0|}{|k_1 \dot{I}_p|}. \quad (11-12)$$

Из (11-12) следует, что $z_{c.p}$ зависит от I_p , во-первых, из-за конечной чувствительности реагирующего реле, характеризуемой напряжением U_0 , и, во-вторых, из-за нелинейности сопротивления выпрямителей в магнитопроводе трансреакторов, в результате которой коэффициенты k_1 и k_4 не остаются постоянными, а меняются с изменением тока I_p .

Зависимость $z_{c.p}$ от I_p является недостатком конструкции, она вызывает непостоянство зоны действия реле (см. § 11-11), т. е. погрешность в $z_{c.p}$.

Сглаживание пульсации выпрямленного тока. Для сглаживания кривой выпрямленных токов в схеме должны быть предусмотрены сглаживающие устройства, рассмотренные в § 2-15. В данной схеме для сглаживания тока предусмотрен конденсатор C . Как указывалось, сглаживающие устройства приводят к некоторому замедлению действия реле.

Реле подобного типа со схемой сравнения на балансе токов и магнитоэлектрическим реле в качестве реагирующего органа применяется в дистанционной защите ДЗ-1 для сети 35 кВ, разработанной лабораторией Энергосетьпроект с участием ЧЭТНИИ и выпускаемой ЧЭАЗ.

в) Направленное реле сопротивления с круговой характеристикой

Направленное реле сопротивления показано на рис. 11-10, а. Реле основано на сравнении абсолютных значений двух напряжений

$$\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p \quad \text{и} \quad \dot{U}_{II} = k_4 \dot{I}_p. \quad (11-13)$$

Здесь $k_4 = k_2$.

Сравниваемые напряжения U_I и U_{II} получаются с помощью вспомогательного трансформатора напряжения TN_1 и двух одинаковых трансреакторов TP_1 и TP_2 . Вторичные обмотки трансреакторов замкнуты на активное сопротивление r .

(рис. 11-10, б). Под действием э. д. с. в контуре вторичной обмотки возникает ток $I \equiv E \equiv I_p$, отстающий от E на угол δ , определяемый соотношением x и r контура. Напряжение на вторичных зажимах трансреактора $U = Ir$, с учетом того, что $I \equiv I_p$, $\dot{U} = k_2 \dot{I}_p$. Здесь k_2 — комплексная величина, имеющая размерность сопротивления и зависящая от параметров трансреактора.

Вторичные обмотки TH_1 и TP_1 соединяются между собой встречно (рис. 11-10, а), так чтобы на выходных зажимах образовалось напряжение $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p$. Напряжение $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{I}_p$ получается с зажимов вторичной обмотки TP_2 . Напряжение U_I подводится к двухполупериодному выпрямителю B_1 , а U_{II} — к выпрямителю B_2 .

Выпрямленные напряжения сопоставляются по величине с помощью схемы сравнения на балансе токов или балансе напряжения. На рис. 11-10, а показана схема на балансе напряжения.

В качестве реагирующего исполнительного органа (нуль-индикатора) $ИО$ используются высокочувствительные магнитоэлектрические реле или нуль-индикатор на полупроводниках с поляризованным реле на выходе. Сглаживание кривой выпрямленных напряжений и токов осуществляется конденсатором или фильтром, запирающим путь переменной составляющей в обмотку реле $ИО$.

Как видно из схемы, напряжение $|\dot{U}_I|$ и $|\dot{U}_{II}|$ и создаваемые ими токи $|\dot{I}_I|$ и $|\dot{I}_{II}|$ направлены в контуре реле PO навстречу друг другу. Поэтому напряжение на зажимах mn нуль-индикатора

$$\dot{U}_{но} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I| = |k_2 \dot{I}_p| - |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|.$$

Реле срабатывает, если $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$. Условия начала работы реле характеризуются уравнением $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$ или

$$|k_2 \dot{I}_p| = |k_1 \dot{U}_p - k_2 \dot{I}_p|. \quad (11-14)$$

Условия работы подобного реле на балансе токов аналогичны и выражаются таким же уравнением, так как $I_I \equiv U_I$, а $I_{II} \equiv U_{II}$. Разделив все члены выражения (11-14) на k_1 и I_p , приняв, что $k_2/k_1 = z'/2$, и учтя, что $z_p = U_p/I_p$, соответствующее условию срабатывания (11-14), является $z_{с.р}$, получим:

$$\left| \frac{z'}{2} \right| - \left| z_{с.р} - \frac{z'}{2} \right| = 0. \quad (11-15)$$

Уравнение (11-15) является уравнением окружности, проходящей через начало координат, с диаметром z' (см. рис. 11-10, в). В этом можно убедиться, сопоставив уравнение (11-15) с (11-4), приняв в последнем $z'' = 0$.

Следовательно, рассмотренное реле является **направленным реле сопротивления**.

Как уже отмечалось, у реле с такой характеристикой $z_{с.р}$ зависит от значения угла φ_p .

При $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$, где $\varphi_{м.ч}$ — угол сопротивления z' , $z_{с.р} = z'$ и имеет максимальное значение. При всех других значениях φ_p $z_{с.р} < z'$ и определяется из выражения $z_{с.р} = z' \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p)$. Последнее вытекает из рис. 11-10, в. Поскольку

$$z' = 2 \frac{k_2}{k_1}, \quad (11-16)$$

то величина z' и $z_{с.р}$ может регулироваться изменением k_1 и k_2 , т. е. коэффициентами трансформации (числом витков) TN_1 и TP . Угол $\varphi_{м.ч}$ определяется параметрами трансреактора TP_1 и TP_2 и может регулироваться изменением сопротивления r . Обычно $\varphi_{м.ч}$ принимается равным углу сопротивления защищаемой линии и колеблется в пределах от 60 до 80° .

Выше аналитическим методом было показано, что рассмотренное реле является направленным реле сопротивления. То же самое можно показать, исходя из физической картины зависимости величин I_I и I_{II} (или U_I и U_{II}) от местоположения точки к. з. (рис. 11-40, а).

Действительно, реле работает при $|\dot{U}_{II}| > |\dot{U}_I|$ или с учетом того, что $|\dot{U}_{II}| = \left| \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$, а $|\dot{U}_I| = \left| \dot{I}_p z_p - \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$, получим: $\left| \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right| > \left| \dot{I}_p z_p - \dot{I}_p \frac{z'}{2} \right|$; сократив обе части на I_p , находим условие работы $\left| \frac{z'}{2} \right| > \left| z_p - \frac{z'}{2} \right|$, где z_p — сопротивление до точки к. з. Рассмотрим самый простой случай, когда $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$ (при этом векторы z_p и z' совпадают по фазе); прибавим к обоим частям неравенства $\left| \frac{z'}{2} \right|$, тогда условие срабатывания преобразуется в выражение $z_p \leq z'$.

При к. з. на участке AB (точка K_1) $z_p < z'$, поэтому реле будет работать, так как при этом $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

При к. з. за точкой B (в точке K_2) $z_p > z'$, значит, реле не действует, поскольку при этом $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

При к. з. до точки A (в точке K_3) z_p отрицательно, в этом случае реле опять не действует, так как $|\dot{U}_{II}| < |\dot{U}_I|$.

Приведенный анализ показывает, что соотношение $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ при выбранной функциональной связи по выражению (11-13) зависит от местоположения к. з.

Устранение мертвой зоны. Для устранения мертвой зоны в рабочий и тормозной контуры реле вводится одинаковая э. д. с. «п а м я т и» $E_{п}$, создаваемая трансформатором TN_2 . Первичная обмотка TN_2 питается напряжением сети $U_{п}$ и с помощью емкости C настроена в резонанс при $f = 50$ Гц. Схема включения TN_2 на напряжение сети выбрана так, что $E_{п}$ примерно совпадает по фазе с U_p , это видно из векторной диаграммы на рис. 11-10, б.

Для этого на вход TN_2 подается напряжение фазы, не подводимой к TN_1 . Например, если $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$, то $\dot{U}_{п} = \dot{U}_C$.

Тогда при близких двухфазных к. з., вызывающих снижения U_p до нуля, напряжение третьей не поврежденной фазы,

подведенное к TN_2 , сохраняется и обеспечивает работу реле за счет напряжения, обусловленного э. д. с. E_n .

При трехфазных к. з. все напряжения падают до нуля. В этом случае э. д. с. E_n поддерживается некоторое время за счет разряда конденсатора C .

В течение времени разряда конденсатора э. д. с. «памяти» создает ток в обоих контурах, обеспечивая работу реле. Чтобы свести к минимуму искажающее влияние E_n на $z_{с.р.}$, величина этой э. д. с. берется не больше 3—5% нормального значения U_p .

По рассмотренной схеме на балансе напряжений с магнитоэлектрическим реле на выходе завод ЧЭАЗ выпускает реле сопротивления типа КРС-1 [Л. 96].

Для упрощения анализа условие срабатывания (11-14) составлено без учета конечной чувствительности исполнительного органа ИО. С учетом этого условие срабатывания реле примет вид $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I| + |\dot{U}_0|$, где U_0 — наименьшее напряжение, которое нужно подать в рабочую цепь (выпрямитель B_2) для приведения в действие реле, при условии, что $U_1 = 0$.

Как и в предыдущем случае, напряжение U_0 создает некоторую зависимость $z_{с.р.}$ от тока I_p (см. § 11-6, б).

г) Направленное реле сопротивления с эллиптической (овальной) характеристикой

Реле, построенное на сравнении величин трех напряжений. Общий принцип выполнения реле представлен на рис. 11-11. К реле подводятся три напряжения:

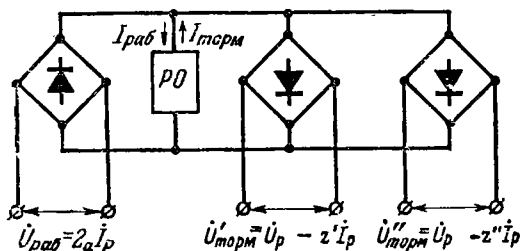


Рис. 11-11. Направленное реле сопротивления с эллиптической характеристикой, на сравнении трех напряжений.

рабочее $\dot{U}_{раб} = 2a\dot{I}_p$ и два тормозных $\dot{U}'_{торм} = \dot{U}_p - z'\dot{I}_p$ и $\dot{U}''_{торм} = \dot{U}_p - z''\dot{I}_p$. Токи, создаваемые тормозными напряжениями, суммируются и с помощью схемы сравнения сопоставляются с рабочим током. В качестве исполнительного органа $РД$ служит нуль-индикатор.

Ток в исполнительном органе $I_p = |\dot{I}_{раб}| - |\dot{I}_{торм}|$. Пограничным условием начала работы реле является равенство

$$I_{PO} = |\dot{I}_{раб}| - |\dot{I}_{торм}| = 0. \quad (11-17)$$

Имея в виду, что токи пропорциональны создающим их напряжениям, заменим $I_{раб}$ и $I_{торм}$ соответствующими напряжениями,

тогда уравнение срабатывания (11-17) примет вид:

$$2aI_p = |\dot{U}_p - z' \dot{I}_p| + |\dot{U}_p - z'' \dot{I}_p|.$$

Деля все члены этого уравнения на I_p и заменяя U_p/I_p на $z_{с.р}$, получаем:

$$|z_{с.р} - z'| + |z_{с.р} - z''| = 2a.$$

Найденное уравнение срабатывания совпадает с (11-5) и является уравнением эллипса, проходящего через начало координат с большей осью, равной $2a$.

Сопротивления z' и z'' являются векторами, определяющими положение фокусов эллипса.

Рассмотренный способ выполнения реле с эллиптической характеристикой относительно сложен.

Ниже приводится более простое выполнение реле с эллиптической (овальной) характеристикой.

д) Реле на сравнении величин двух напряжений с использованием переменной составляющей выпрямленных напряжений (или токов)

Реле выполняется так же, как и рассмотренные выше направленные реле сопротивления с круговой характеристикой (рис. 11-10).

Отличительными особенностями конструкции, позволяющими получить вместо круговой эллиптическую характеристику, являются:

1) использование переменной составляющей выпрямленного тока, в связи с чем пульсация последнего не сглаживается, а, наоборот, сохраняется;

2) применение в качестве реагирующего органа нуля-индикатора замедленного действия.

Упрощенная схема такого реле показана на рис. 11-12. К реле подводятся два напряжения: $\dot{U}_I = \dot{U}_p - z' \dot{I}_p$ и $\dot{U}_{II} = z' \dot{I}_p$. Первое является тормозным, а второе — рабочим.

Схема сравнения их величин может выполняться на балансе токов или, как показано на рис. 11-12, на балансе напряжений. В последнем случае напряжение на выходе схемы

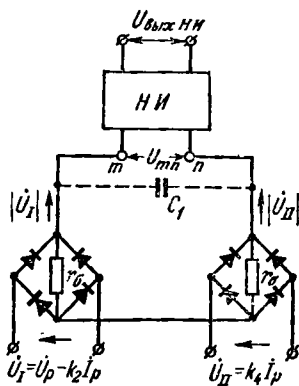


Рис. 11-12. Реле с эллиптической характеристикой, основанное на использовании переменной составляющей выпрямленного тока.

$$\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|. \quad (11-18)$$

Это напряжение подводится к зажимам нуль-индикатора *НИ*, работающего с выдержкой времени $t = 0,01$ с.

Выходное напряжение. В схеме не предусматривается сглаживающего устройства, поэтому выпрямленные напряжения $|\dot{U}_I|$ и

$|\dot{U}_{II}|$ и выходное напряжение $\dot{U}_{mn}$ имеют пульсирующий характер (рис. 11-13, а и б) и состоят из постоянной и переменной составляющих (см. § 2-15).

Из схемы сравнения и выражения (11-18) следует, что постоянная составляющая выходного напряжения U_{mn} равна разности по-

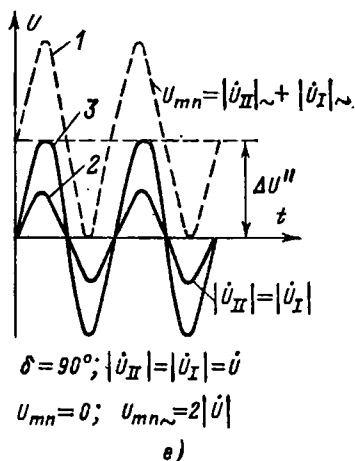
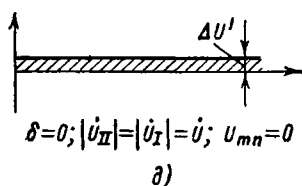
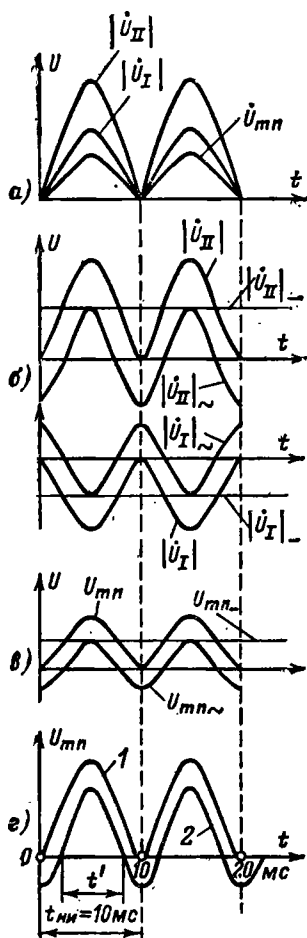


Рис. 11-13. Напряжение U_{mn} на входе нуль-индикатора и его составляющие (постоянная U_{mn-} и переменная $U_{mn\sim}$) при различных углах сдвига δ между $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

стоянных составляющих сравниваемых напряжений $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$:

$$U_{mn-} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|, \quad (11-18a)$$

а переменная составляющая U_{mn} ($U_{mn\sim}$) — геометрической разности переменных слагающих $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$:

$$U_{mn\sim} = |\dot{U}_{II}| - |\dot{U}_I|. \quad (11-18б)$$

Как видно из (11-18а), величина постоянной составляющей выходного напряжения U_{mn} зависит только от абсолютных значений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, которыми определяются величины их постоянных слагающих.

Величина же переменной слагающей U_{mn} , определяемая геометрической разностью составляющих $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$, зависит как от величины этих составляющих, так и от сдвига фаз δ' между ними.

Величины $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ в свою очередь определяются величиной сравниваемых напряжений $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, а δ' углом δ между ними, поэтому переменная составляющая на входе нуль-индикатора в конечном счете зависит от величины и сдвига фаз между сравниваемыми напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Переменная слагающая выпрямленного напряжения приближенно равна его второй гармонике (см. § 2-15) и имеет поэтому в 2 раза большую частоту по сравнению с выпрямляемым напряжением. В результате этого при $\delta = \omega t$ $\delta' = 2\omega t$, т. е. $\delta' = 2\delta$.

При $\delta = 0$ или 180° $\delta' = 0$ или 360° , в этом случае переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ совпадают по фазе и направлены в контуре схемы сравнения встречно, поэтому напряжение U_{mn} равно арифметической разности их абсолютных значений и будет меньше, чем при других значениях δ .

При $\delta = 90$ или 270° $\delta' = 180$ или 540° , переменные составляющие $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ противоположны по фазе и направлены в контуре схемы сравнения в одну сторону, вследствие чего U_{mn} равно арифметической сумме $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$. В этом случае переменная слагающая U_{mn} на зажимах нуль-индикатора имеет максимальное значение.

При $\delta > 0$, но меньше 90° , $\delta' > 0$, но меньше 180° ; напряжение U_{mn} равно геометрической разности $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$ и имеет промежуточное (между максимальным и минимальным) значение.

Из сказанного следует, что величины U_{mn} и U_{mn} результирующего есть функция угла δ .

Условия срабатывания реле. Время действия нуль-индикатора $t_{ни}$ принято равным периоду переменной слагающей 100 Гц (который равен 0,01 с). При таком исполнении нуль-индикатор может сработать только в случае, если $U_{mn} = U_{mn} - U_{mn}$ имеет положительное значение в течение времени действия нуль-индикатора $t_{ни} = 0,01$ с (кривая 1 на рис. 11-13, з).

Следовательно, для срабатывания рассматриваемого реле необходимо выполнить два условия:

первое, как обычно для реле на сравнении двух величин,

$$|\dot{U}_{II}| \geq |\dot{U}_I| \quad (11-19)$$

и второе, обусловленное замедлением нуль-индикатора,

$$t_{\text{вых. пол}} \geq t_{ни} = 0,01 \text{ с}, \quad (11-19а)$$

где $t_{\text{вых.пол}}$ — продолжительность непрерывного положительного импульса выходного напряжения U_{mn} .

Графически условия срабатывания показаны на рис. 11-13, г. Кривая 1 напряжения U_{mn} соответствует началу работы реле, так как при этом $t_{\text{вых.пол}} = t_{\text{ин}}$. Если кривая U_{mn} расположена выше кривой 1, $t_{\text{вых.пол}}$ увеличивается и условия работы реле улучшаются, если же кривая U_{mn} окажется ниже (кривая 2), то условие (11-19а) не выполняется $t_{\text{вых.пол}} < t_{\text{ин}}$ и реле работать не будет.

Поскольку $U_{mn} = U_{mn-} - U_{mn\sim}$, то для обеспечения пограничных (начальных) условий действия реле необходимо иметь такое преобладание U_{II} над U_I , при котором синусоида $U_{mn\sim}$ займет предельное положение, совпадающее с кривой 1 на рис. 11-13, г.

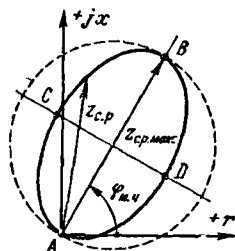


Рис. 11-14. Эллиптическая характеристика реле по рис. 11-12.

Сопроотивление срабатывания. Покажем, что ΔU (равное $U_{II} - U_I$), а следовательно, и $z_{c.p}$ зависят от угла δ сдвига фаз между $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$. Действительно, при совпадении фаз $\dot{U}_{II}$ и $\dot{U}_I$, когда $\delta = 0$, пограничным условием действия реле будет равенство $U_{II} = U_I$. В этом случае постоянные и переменные слагающие U_{mn} равны разности соответствующих составляющих $|\dot{U}_{II}|$ и $|\dot{U}_I|$, вследствие чего $\dot{U}_{mn} = 0$. Реле в этом случае обладает наибольшей чувствительностью, так как для его срабатывания

достаточно незначительное превосходство U_{II} над U_I (рис. 11-13, д). Соответствующее этому $z_{c.p}$ показано на рис. 11-14, вектором $z_{c.p. макс}$ с углом $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$. Это $z_{c.p} = z'$, что следует из рассмотрения уравнений (11-19).

При $\delta \neq 0$ в U_{mn} появляется переменная составляющая $U_{mn\sim}$, достигающая максимального значения при $\delta = 90^\circ$, когда $U_{mn\sim} = |\dot{U}_{II}|_{\sim} + |\dot{U}_I|_{\sim}$.

При $|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I|$ постоянная составляющая $U_{mn-} = 0$ и к нуль-индикатору подводится только $U_{mn\sim}$, расположенное симметрично относительно нулевой линии (кривая 2 на рис. 11-13, е). Условие (11-19а) не выполняется, и реле не работает. Для срабатывания реле необходимо увеличить $\dot{U}_{II}$ на величину $\Delta U''$, так чтобы кривая напряжения U_{mn} не имела отрицательных значений (рис. 11-13, е). Условие срабатывания реле для этого случая можно выразить равенством

$$|\dot{U}_{II}| = |\dot{U}_I| + \Delta U''. \quad (11-19б)$$

Срабатывание реле в этом случае произойдет при большем U_{II} , а следовательно, и I_p , так как $U_{II} = kI_p$, чем это должно быть при $\delta = 0$ [уравнение (11-19)]. Это означает, что $z_{c.p}$ при $\delta \neq 0$ будет

меньше, чем при $\delta = 0$, а угол φ_p вектора $z_{c.p}$ будет отличаться от $\varphi_{м.ч.}$, т. е. $\varphi_p \neq \varphi_{м.ч.}$.

Чем ближе к 90° будет δ , тем больший избыток $U_{II} (\Delta U)$ необходим для работы реле, соответственно будет увеличиваться I_p и уменьшаться $z_{c.p}$.

Сопротивления $z_{c.p}$, а следовательно, и чувствительность реле имеют наименьшее значение при $\delta = 90^\circ$, так как амплитуда U_{mn} в этом случае будет равна арифметической сумме $U_{II} + U_{I-}$ и достигнет наибольшего значения, чему соответствует максимальная величина ΔU в (11-196).

Характеристика реле. Таким образом, когда $\delta = 0$, реле имеет наибольшую чувствительность (рис. 11-14) и его зона действия равна $z_{ср.макс} = z'$, т. е. равна диаметру AB окружности, а когда $\delta \neq 0$, чувствительность реле уменьшается и его зона действия сокращается, так как для срабатывания реле при том же U_p необходимо большее, чем в предыдущем случае, увеличение I_p (т. е. U_{II}). При этом $z_{c.p}$ получается меньшее, чем $z_{ср.макс}$ (диаметра окружности), что приводит к сжатию окружности и превращает ее в эллипс (рис. 11-14).

Степень сжатия окружности характеризуется величиной малой оси эллипса, ее можно изменять, включая емкость C_1 , которая меняет относительное значение переменной составляющей в выпрямленном токе.

Подобная конструкция реле сопротивления разработана ВНИИЭ [Л. 47] и применяется в дистанционных защитах ДЗ-2, выпускаемых ЧЭАЗ.

11-7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

а) Электромагнитное реле полного сопротивления

Реле (рис. 11-15) состоит из двух электромагнитов 1 и 2, подвижного стального коромысла 3, закрепленного на оси 6, контактов 4 и противодействующей пружины 5. Обмотка T питается током I_p , а обмотка H — напряжением сети U_p через трансформатор 7.

На коромысло 3 действуют моменты:

$$M_T = k_T I_p^2 \quad (11-20)$$

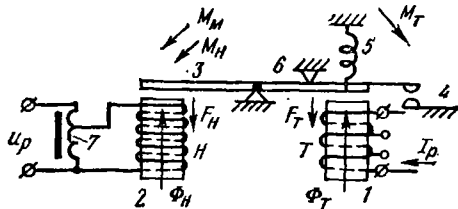


Рис. 11-15. Электромагнитное реле полного сопротивления.

на замыкание контактов реле, от напряжения

$$M_H = k_H U_p^2 \quad (11-21)$$

на их размыкание и механический момент $M_{мех}$ (пружины 5 и трения), противодействующий замыканию контактов.

В нормальном режиме сети отношение $U_p/I_p = z_p$ таково, что $M_T < M_H + M_{\text{мех}}$, при этом $z_p > z_{\text{с.р}}$ и реле не действует. В случае к. з. напряжение U_p уменьшается, ток I_p возрастает и соответственно уменьшается тормозной момент M_H и растет рабочий момент M_T . При $z_p \leq z_{\text{с.р}}$ момент $M_T \geq (M_H + M_{\text{мех}})$, реле срабатывает, замыкая свои контакты.

Пограничным условием начала работы реле является равенство моментов $M_T = M_H + M_{\text{мех}}$, при этом $z_p = z_{\text{с.р}}$. Пренебрегая моментом $M_{\text{мех}}$, с учетом (11-20) и (11-21) получаем:

$$k_T I_p^3 = k_H U_p^2.$$

Разделив обе части этого уравнения на k_H и I_p^3 , найдем сопротивление, при котором происходит срабатывание реле:

$$z_{\text{с.р}} = \frac{U_p}{I_p} = \sqrt{\frac{k_T}{k_H}}. \quad (11-22)$$

Уравнение (11-22) показывает, что $z_{\text{с.р}}$ реле имеет постоянную величину, не зависящую от φ_p . Характеристика такого реле изображается окружностью с радиусом $\sqrt{k_T/k_H}$ и центром в начале координат (рис. 11-7, а). Таким образом, рассмотренное реле является ненаправленным реле сопротивления.

Если в (11-22) учесть $M_{\text{мех}}$, то

$$z_{\text{с.р}} = \sqrt{\frac{k_T}{k_H} - \frac{M_{\text{мех}}}{k_H I_p^3}}. \quad (11-22a)$$

Из этого выражения следует, что благодаря наличию механического момента $z_{\text{с.р}}$ зависит от I_p .

б) Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле

Устройство реле. Реле выполнено на четырехполюсной магнитной системе с цилиндрическим ротором (рис. 11-16), применяемой для реле мощности. На магнитопроводе реле расположены две обмотки 1 и 2.

Обмотка 1 питается напряжением

$$\dot{U}_I = \dot{U}'_p + \dot{E}, \quad (11-23)$$

а обмотка 2 — напряжением

$$\dot{U}_{II} = \dot{U}'_p - \dot{E}, \quad (11-24)$$

где $\dot{U}'_p$ — напряжение, пропорциональное напряжению сети $\dot{U}_p$; $\dot{E}$ — э. д. с., пропорциональная току сети I_p .

Напряжение U_p подводится к реле через автотрансформатор АТН с регулируемым коэффициентом трансформации k_H :

$$\dot{U}'_p = k_H \dot{U}_p.$$

Электродвижущая сила E создается трансреакторами TP_1 и TP_2 , первичные обмотки которых питаются током I_p . Вторичная э. д. с. трансреактора равна:

$$\dot{E} = -jk_T \dot{I}_p, \quad (11-25)$$

она отстает от индуктирующего ее тока I_p на 90° и пропорциональна ему по величине (рис. 11-16, б).

При этом условии коэффициент k_T , характеризующий взаимную индукцию между первичной и вторичной обмотками трансреактора, имеет постоянное значение.

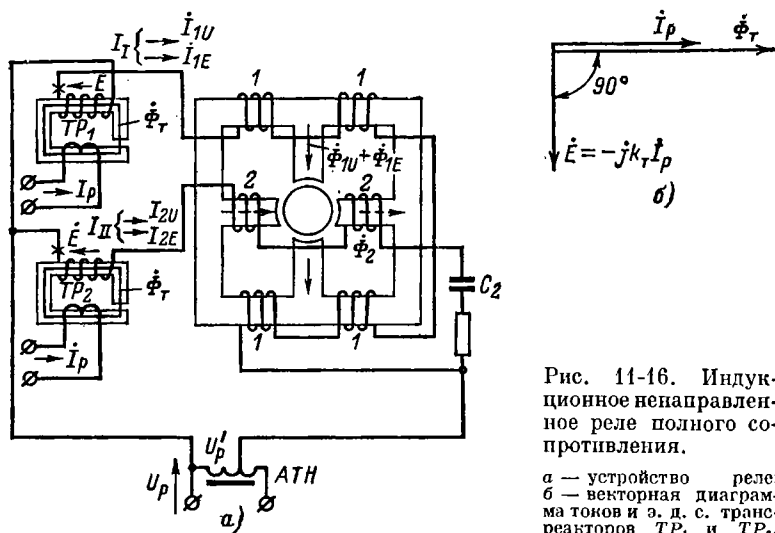


Рис. 11-16. Индукционное ненаправленное реле полного сопротивления.

а — устройство реле;
б — векторная диаграмма токов и э. д. с. трансреакторов TP_1 и TP_2 .

Полярность включения вторичных обмоток TP_1 и TP_2 подбирается таким образом, чтобы э. д. с. E и напряжение U'_p имели согласно условиям (11-23) и (11-24) одинаковое направление в цепи обмотки 1 и противоположное в цепи обмотки 2.

Принцип действия реле. Под действием напряжения U_I и U_{II} в обмотках 1 и 2 возникают токи:

$$\begin{aligned} \dot{I}_I &= \frac{\dot{U}'_p + \dot{E}}{z_1} \\ \dot{I}_{II} &= \frac{\dot{U}'_p - \dot{E}}{z_2}, \end{aligned} \quad (11-26)$$

сдвинутые относительно напряжений на углы β_1 и β_2 . Токи I_I и I_{II} образуют магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ . Векторная диаграмма напряжений, токов и потоков реле представлена на рис. 11-17, а. Взаимодействуя с вихревыми токами в подвижной системе, потоки

создают электромагнитный момент (см. § 2-9, б)

$$M_3 = k\Phi_1\Phi_2 \sin \psi. \quad (11-27)$$

Как видно из векторной диаграммы, угол $\psi = \delta - (\beta_1 + \beta_2)$. Параметры цепей обмоток 1 и 2 подобраны при помощи конденсатора C_2 с таким расчетом, чтобы $\beta_1 + \beta_2 = 90^\circ$.

При этом угол $\psi = \delta - 90^\circ$, а $\sin \psi = \cos \delta$. С учетом этого, а также имея в виду, что $\Phi_1 = k_1 U_I$, $\Phi_2 = k_2 U_{II}$, выражение (11-27) приводится к виду

$$M_3 = k' U_I U_{II} \cos \delta. \quad (11-28)$$

Из полученного выражения следует, что знак момента реле M_3 зависит от угла δ между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле.

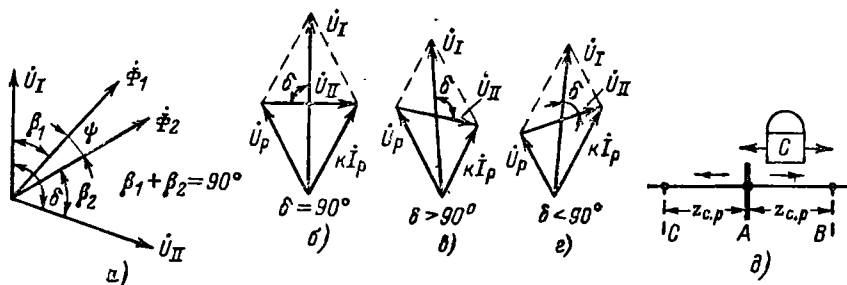


Рис. 11-17. Векторные диаграммы, поясняющие работу реле на рис. 11-16.

Условие начала действия реле, если пренебречь противодействием от механического момента $M_{мех}$, выражается на основе (11-28) равенством $M_3 = 0$.

Из диаграммы рис. 11-17, б видно, что это условие наступит при

$$|k_H \dot{U}_p| = |k_T \dot{I}_p|. \quad (11-29)$$

В этом случае $\delta = 90^\circ$ и, следовательно, $\cos \delta$ и M_3 равны нулю.

Разделив обе части (11-29) на I_p и k_H , получим, что реле начинает работать при сопротивлении

$$z_p = \frac{k_T}{k_H}.$$

При

$$|k_H \dot{U}_p| < |k_T \dot{I}_p| \quad (11-30)$$

согласно диаграмме на рис. 11-17, г угол $\delta < 90^\circ$. Поэтому $\cos \delta > 0$, момент M_3 положителен и действует на замыкание контактов. Разделив обе части неравенства (11-30) на I_p и k_H , найдем, что в этом случае

$$|z_p| < \frac{k_T}{k_H}.$$

Если

$$|k_H \dot{U}_p| > |k_T \dot{I}_p|, \quad (11-31)$$

то, как видно из диаграммы на рис. 11-17, $\alpha, \delta > 90^\circ$. Следовательно, $\cos \delta < 0$ и момент M_δ действует на размыкание контактов реле. Из неравенства (11-31) находим, что при этом $|z_p| > k_T/k_H$.

Таким образом, рассмотренное реле реагирует на угол сдвига δ между напряжениями $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$, питающими обмотки реле, и ведет себя как реле минимального сопротивления, поскольку условием его действия является выражение

$$|z_p| \leq \frac{k_T}{k_H}.$$

Это условие справедливо при любом φ_p . Поэтому характеристика такого реле изображается в осях r, x окружностью с центром в начале координат (рис. 11-7, a) и радиусом $z' = k_T/k_H$.

Если такое реле установить в сети (рис. 11-17, ∂), то оно будет действовать в обе стороны от места установки защиты (точки A), т. е. на участке AB и AC , с сопротивлением

$$z_{AB} = z_{AC} = \frac{k_T}{k_H}.$$

Сопротивление срабатывания реле $z_{с.р}$ можно регулировать изменением k_H или k_T , в первом случае меняется коэффициент трансформации автотрансформатора напряжения ATH , а во втором — число витков первичной обмотки обоих трансреакторов TP_1 и TP_2 .

Рассмотренное реле можно превратить в реле сопротивления со смещенной характеристикой, показанной на рис. 11-7, $в$. Для этого нужно выбрать разную величину коэффициента k_T в трансреакторах TP_1 и TP_2 . В этом случае э. д. с. E , вводимые в цепь обмотки 1 и 2, будут неодинаковы.

Центр окружности у такого реле смещается по отношению к началу координат. На рассмотренном принципе выпускались реле типов КРС-111 и КРС-112.

в) Индукционное направленное реле сопротивления, реагирующее на угол сдвига фаз между напряжениями U_I и U_{II} , питающими обмотки реле

Конструкция направленного реле сопротивления изображена на рис. 11-18.

Конструктивно реле выполнено так же, как и предыдущее реле (рис. 11-16), но отличается от него параметрами обмоток и питающими их напряжениями U_I и U_{II} .

Последние образуются из тока и напряжения сети (I_p и U_p) по (11-6), при этом принимается, что $k_1 = k_H$; $k_2 = -z'$; $k_3 = 1$; $k_4 = 0$.

Обмотка 1 называется рабочей, она питается напряжением $\dot{U}_1$, равным разности напряжения сети $\dot{U}_p$ и падения напряжения в сопротивлении зоны действия защиты z' при протекании по нему тока I_p , т. е.

$$\dot{U}_I = k_H \dot{U}_p - \dot{I}_p z', \quad (11-31a)$$

где k_H — коэффициент пропорциональности.

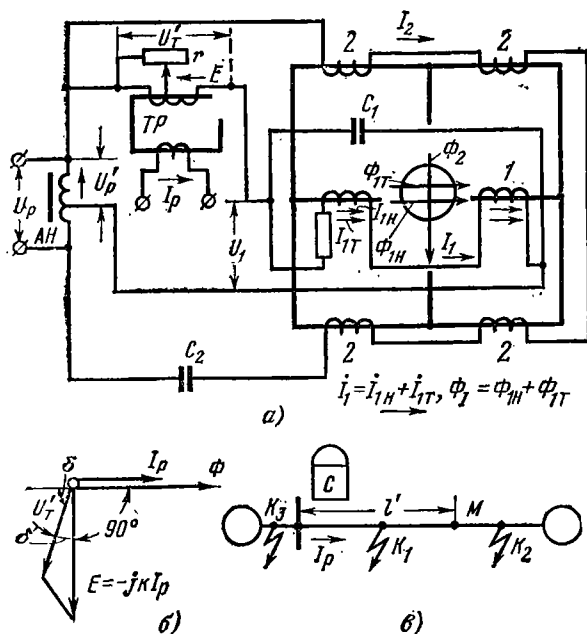


Рис. 11-18. Индукционное направленное реле полного сопротивления.

а — принципиальная схема реле; б — векторная диаграмма трансреактора ТР; в — зона действия реле I' (I''); г — векторная диаграмма токов и магнитных потоков реле.

Падение напряжения $I_p z' = U'$ называется компенсирующим, так как оно компенсирует в напряжении U_p составляющую падения напряжения на сопротивлении участка линии $z_n = z'$. Благодаря компенсации обмотка реле 1 оказывается подключенной не на напряжение U_p в месте установки защиты, а на напряжение в конце зоны действия защиты (точка M на рис. 11-18, е).

Вторая обмотка 2 называется *поляризующей* и питается напряжением

$$\dot{U}_{\text{II}} = \dot{U}_{\text{D}}.$$

Напряжение сети подводится к рабочей обмотке через автотрансформатор $АН$ с коэффициентом трансформации k_n . К поляризующей обмотке напряжение U_0 подводится непосредственно.

Напряжение компенсации U' получается с помощью трансреактора TP (рис. 11-48, *а* и *б*). Благодаря сопротивлению r результирующее напряжение на вторичных зажимах трансреак-

тора $\dot{U}' = \dot{E} + \Delta \dot{U}$ смещено относительно вторичной э. д. с. E на угол δ' .

Величина r подбирается так, чтобы дополнительный угол $\delta = 90^\circ - \delta'$ равнялся углу сопротивления защищаемой линии $\varphi_{\text{л}}$.

При выполнении этого условия напряжение компенсации I_{pz}' будет совпадать по фазе с падением напряжения до места к. з. $\dot{U}_p = \dot{I}_{pz_k}$.

Принцип действия реле. Напряжения U_I и U_{II} вызывают в обмотках реле токи I_I и I_{II} , которые создают магнитные потоки Φ_I и Φ_{II} , смещенные в пространстве на 90° и сдвинутые по фазе на угол ψ (рис. 11-18). Эти потоки образуют электромагнитный момент

$$M_0 = k\Phi_I\Phi_{II} \sin \psi.$$

Учитывая, что потоки пропорциональны токам, получаем:

$$M_0 = k' I_I I_{II} \sin \psi. \quad (11-32)$$

Величина и знак момента, а следовательно, поведение реле будут определяться углом ψ между токами I_I и I_{II} в обмотках реле.

Ток I_{II} в поляризующей обмотке определяется остаточным напряжением U_p , и его направление в обмотке 2 не меняется. Поэтому угол ψ полностью зависит от тока I_I в рабочей обмотке, направление и фаза которого в свою очередь определяются знаком и фазой напряжения $\dot{U}_I = \dot{U}_p - \dot{I}_{pz}'$.

Векторные диаграммы на рис. 11-19 позволяют определить знак угла ψ . За исходные векторы при построении диаграммы приняты $\dot{U}_p$ и $\dot{I}_p$. Ток I_{II} опережает $U_{II} = U_p$ на угол β_2 , а ток I_I отстает от U_I на угол β_1 . Значения β_1 и β_2 определяются параметрами обмоток 1 и 2 и являются постоянными величинами. Знак угла ψ принимается положительным, когда I_I опережает I_{II} , и отрицательным, если I_I отстает от I_{II} .

При к. з. в конце зоны действия реле (точка M на рис. 11-19, а) сопротивление до точки к. з. $z_k = z'$. Поэтому падение напряжения до точки к. з. и напряжение компенсации равны по величине и фазе. В результате этого $\dot{U}_I = \dot{U}_p - \dot{I}_{pz}' = 0$, следовательно, ток и магнитный поток рабочей обмотки (I_I и Φ_I) равны нулю и реле не работает.

При к. з. в зоне до точки M $z_{k1} < z'$, падение напряжения в сопротивлении z_{k1} $U_p < I_{pz}'$, поэтому вектор U_I противоположен $\dot{U}_p$. Как видно из векторной диаграммы (рис. 11-19, б), ток I_I и поток Φ_I опережают I_{II} и Φ_2 , а угол ψ положителен. В результате этого $M_0 > 0$ и реле приходит в действие.

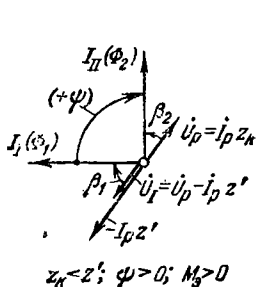
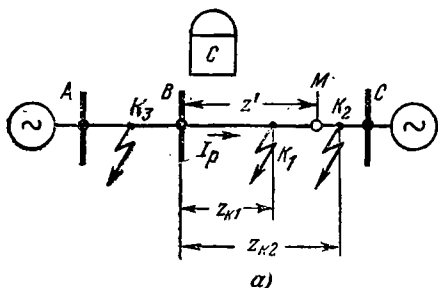
При к. з. за зоной (за точкой M) $z_{k2} > z'$, при этом $U_p > I_{pz}'$, а вектор U_I [см. (11-31а)] совпадает по фазе с U_p . Диаграмма на рис. 11-19, в показывает, что ток I_I вследствие изменения фазы напряжения U_I изменяет свое направление на 180° .

При этом ток I_I и поток Φ_I отстают от I_{II} и Φ_2 , угол ψ становится отрицательным и реле не действует, так как $M_\varphi < 0$.

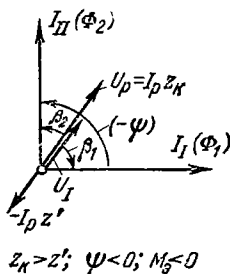
При к. з. за шинами подстанции в точке K_3 мощность к. з. и ток I_p меняют свое направление, в результате чего напряжение компенсации $I_p z'$ становится отрицательным. В этом случае $\dot{U}_I = \dot{U}_p + \dot{I}_p z'$ и совпадает по направлению, как и в предыдущем случае, с вектором $\dot{U}_p$. Из диаграммы на рис. 11-19, а видно, что

ψ имеет отрицательный знак и поэтому реле не работает.

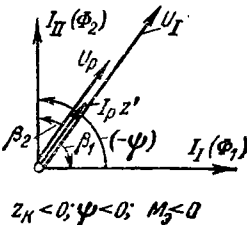
Таким образом, фаза тока в рабочей обмотке зависит от местоположения точки повреждения. Реле работает в пределах зоны, определяемой сопротивлением z' . При переходе к. з. за пределы зоны фаза тока I_I меняет свое на-



б)



в)



г)

Рис. 11-19. Векторные диаграммы токов и магнитных потоков реле при различных случаях к. з.

а — участок защищаемой сети; б — к. з. в пределах зоны защиты (точка K_1); в — к. з. за пределами зоны (точка K_2); г — к. з. за шинами подстанции В (точка K_3).

правление на 180° и реле прекращает действовать. Реле реагирует на направление мощности к. з., так как при к. з. за шинами В оно не работает.

В рассмотренных случаях при металлических к. з. $\varphi_p = \varphi_L = \varphi'$ и благодаря подобранным параметрам обмоток угол ψ между токами I_I и I_{II} равен 90° . Поэтому реле имеет максимальную чувствительность.

При к. з. через дугу, при нагрузке и качаниях $\varphi_p \neq \varphi_L$ напряжение компенсации и U_p не совпадают по фазе, вследствие чего угол ψ между токами I_I и I_{II} отклоняется от 90° . Это вызывает уменьшение момента M_φ и сокращение зоны действия реле.

Таким образом, $z_{c.p}$ зависит от φ_p : при $\varphi_p = \varphi'$ $z_{c.p} = z'$, а при всех других значениях φ_p $z_{c.p} < z'$. Характеристика работы рас-

смотренного реле изображается в осях r, x окружностью, проходящей через начало координат (рис. 11-7, б) с диаметром z' и углом максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч} = \varphi'$.

Уравнение срабатывания реле можно определить аналитическим путем. Для этого магнитный поток Φ_1 рабочей обмотки представляется в виде двух составляющих: одной $\Phi_{1н}$, обусловленной напряжением $k_H U_p$, и второй $\Phi_{1т}$, создаваемой напряжением $I_{pz'}$ (рис. 11-18). Взаимодействие этих потоков с потоком $\Phi_2 = U_p$ поляризующей обмотки создает два момента:

$$M_{12} = k' \Phi_2 \Phi_{1н} \sin \psi_1 = k'_1 U_p^2 \text{ и } M_{22} = k'' \Phi_2 \Phi_{1т} \sin \psi_2 = k''_2 U_p I_p \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p).$$

Здесь учтено, что $\psi_2 = \varphi_{м.ч} - \varphi_p$, где $\varphi_{м.ч} = \varphi' = \varphi_л$.

Начало срабатывания реле характеризуется равенством $M_{12} + M_{22} = 0$, откуда после подстановки и преобразования находится сопротивление срабатывания реле согласно (11-33):

$$z_{с.р} = \frac{U_p}{I_p} = \frac{k''_2}{k'_1} \cos (\varphi_{м.ч} - \varphi_p). \quad (11-33)$$

Выражение (11-33) представляет уравнение окружности, проходящей через начало координат (рис. 11-7, б) с диаметром $OB = \frac{k''_2}{k'_1} = z_{с.р.макс}$. Оно также показывает, что $z_{с.р}$ зависит от φ_p . Реле имеет максимальную чувствительность (наибольшее $z_{с.р}$) при $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$, которое зависит от угла сопротивления z' . Величина $\varphi_{м.ч}$ может изменяться с изменением сопротивления r в цепи трансреактора (рис. 11-18).

Регулирование $z_{с.р}$ реле производится с помощью автотрансформатора $АН$ изменением его коэффициента трансформации k_H или изменением витков трансреактора, что непосредственно меняет величину z' , т. е. уставку реле.

Мертвая зона. Из выражения (11-32) вытекает, что при $U_p = 0$ U_{II} и Φ_2 равны нулю, в результате чего реле не может работать, так как $M_3 = 0$.

Это означает, что при к. з. в начале линии, когда $U_p = 0$ или очень мало, реле не работает, т. е. имеет мертвую зону. Для устранения мертвой зоны предусматривается устройство, называемое «памятью», осуществляемое с помощью конденсатора C_2 (рис. 11-18). При исчезновении U_p во время близкого к. з. конденсатор C_2 , заряженный предшествующим напряжением, разряжается и посылает ток в обмотку 2. Параметры цепи обмотки подбираются так, чтобы ток разряда конденсатора имел колебательный характер с частотой 50 Гц (рис. 11-20). Затухание тока I_C происходит со временем порядка 2—5 периодов, в течение которых взаимодействие потоков обмоток 1 и 2 создает момент M_3 , достаточный для действия реле. Конденсатор C_1 (рис. 11-18) служит для создания необходимого сдвига фаз между током и напряже-

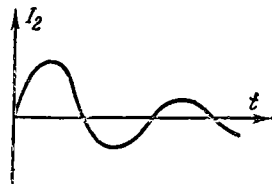


Рис. 11-20. Кривая изменения тока I_2 в обмотке 2 реле на рис. 11-18 при разряде конденсатора C_2 .

нием в обмотке 1 и желаемой величины угла максимальной чувствительности. На рассмотренном принципе ЧЭАЗ выполнялись направленные реле сопротивления типа КРС-131 и КРС-132.

г) Индукционное направленное реле сопротивления для защиты от двухфазных коротких замыканий (компенсационное реле)

Реле и схема его включения предложены советским специалистом А. М. Бреслером. Конструкция реле (рис. 11-21) выполняется аналогично индукционному реле мощности, но отличается от него способом питания обмоток. Реле имеет две обмотки 1 и 2, которые

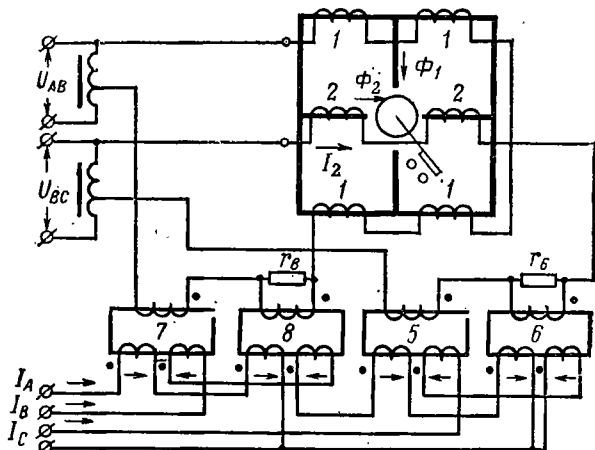


Рис. 11-21. Индукционное реле (системы А. М. Бреслера) для защиты от двухфазных к. з.

питают напряжения U_I и U_{II} . Каждое из этих напряжений представляет собой разность линейного напряжения в месте установки защиты и напряжения компенсации, равного падению напряжения от тока к. з. в заданном сопротивлении защищаемой зоны ¹:

$$\left. \begin{aligned} U_I &= U_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) z'; \\ U_{II} &= U_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C) z'. \end{aligned} \right\} \quad (11-34)$$

Реактивная составляющая компенсирующего напряжения получается при помощи трансреакторов 7 и 5. Их вторичные э. д. с. сдвинуты на 90° относительно первичных токов $\dot{I}_{AB} = \dot{I}_A - \dot{I}_B$

¹ Можно считать, что реле питается компенсированными напряжениями U_I и U_{II} , соответствующими напряжению в конце зоны действия защиты (точка M на рис. 11-18, а). Поэтому данное реле часто называется компенсационным.

и $\dot{I}_{CB} = \dot{I}_C - \dot{I}_B$ и пропорциональны им, т. е.

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_{AB}x'; \quad \dot{E}_2 = -j\dot{I}_{CB}x'.$$

Коэффициент пропорциональности x' численно равен реактивной составляющей сопротивления z' , пересчитанной на вторичное напряжение. Активная составляющая компенсирующего напряжения получается как падение напряжения в активных сопротивлениях r_6 и r_8 при прохождении по ним токов, пропорциональных I_{AB} и I_{CB} и получаемых от вспомогательных трансформаторов 8 и 6.

Под действием напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ создаются магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 . В результате взаимодействия этих потоков возникает электромагнитный момент

$$M_9 = k\Phi_1\Phi_2 \sin \psi. \quad (11-35)$$

Соотношение реактивного и активного сопротивлений в обмотках I и 2 подбирается одинаковым. Благодаря этому угол сдвига ψ между токами $\dot{I}_I$ и $\dot{I}_{II}$ (или потоками Φ_1 и Φ_2) оказывается равным сдвигу фаз δ между векторами напряжений U_I и U_{II} (рис. 11-22).

Учитывая, что $\psi = \delta$ и что магнитные потоки пропорциональны напряжениям, т. е. $\Phi_1 \equiv I_I \equiv U_I$, а $\Phi_2 \equiv I_2 \equiv U_{II}$, преобразуем (11-35), после чего оно примет вид:

$$M_9 = -kU_I U_{II} \sin \delta \quad (11-36)$$

или

$$M_9 = -k[\dot{U}_{AB} - (\dot{I}_A - \dot{I}_B)z'][\dot{U}_{BC} - (\dot{I}_B - \dot{I}_C)z'] \sin \delta.$$

Полученное выражение показывает, что знак момента, а следовательно, и поведение реле зависят от угла сдвига фаз δ между векторами напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Если $\dot{U}_{II}$ опережает $\dot{U}_I$, то угол δ отрицательный, при этом момент M_9 положительный и действует на замыкание контактов. Если $\dot{U}_{II}$ отстает от $\dot{U}_I$, то M_9 отрицательный и действует на размыкание контактов реле, при этом угол δ положительный.

Таким образом, можно считать, что реле реагирует на порядок чередования питающих его напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$. Построив векторные диаграммы напряжений U_I и U_{II} для трехфазных и двухфазных к. з. при повреждениях в точке K_1 (в зоне защиты, $z_K < z'$), в точке K_2 (вне зоны, $z_K > z'$) и в точке K_3 (за шинами подстанции, $z_K < 0$) (рис. 11-23, а), можно определить знак угла δ и какое из двух подведенных к реле напряжений (U_I и U_{II}) является опере-

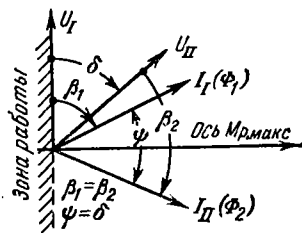


Рис. 11-22. Векторная диаграмма, поясняющая работу реле на рис. 11-21.

жающим. В качестве примера на рис. 11-23, б—д показаны векторные диаграммы U_I и U_{II} для указанных выше повреждений при двухфазном к. з. Из диаграмм следует, что при к. з. до точки M реле работает, так как при этом U_{II} опережает U_I и не действует при к. з. в точке M и за ней. Подобный анализ работы реле [Л. 13, 23, 45] показывает, что при всех симметричных режимах (трехфазные к. з., нагрузки и качания) U_{II} отстаёт от U_I , угол δ положителен и реле не действует. При двухфазных к. з. реле работает в пределах зоны, определяемой z' . При $z_K > z'$, а также при направлении мощности к. з. к шинам реле не действует, так как в этих случаях угол δ положителен и U_{II} отстаёт от U_I .

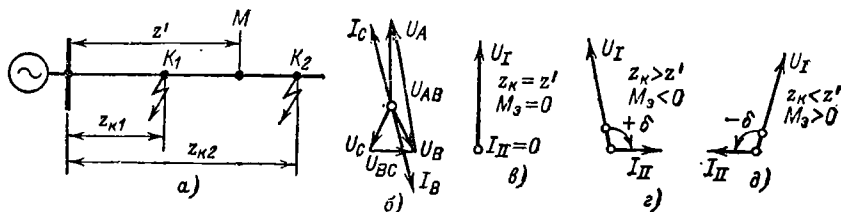


Рис. 11-23. Участок сети и векторные диаграммы к анализу работы реле на рис. 11-21 при двухфазных к. з.

При двухфазных к. з. на землю реле работает в пределах той же зоны, что и при двухфазных замыканиях без земли, обладая направленностью действия. Исследования [Л. 45] показывают, что при близких к. з. реле может не сработать в случае двухфазного к. з. на землю и при определенном сочетании величин z' и тока к. з. Реле реагирует и на однофазные к. з., сохраняя направленность действия. Но в этом случае зона работы реле значительно сокращается, вследствие чего оно не используется для защиты от этого вида повреждений.

Момент реле можно выразить через симметричные составляющие напряжений U_I и U_{II} . В этом случае он получается равным разности квадратов компенсированных напряжений обратной и прямой последовательностей [Л. 13]:

$$M_3 = k (|\dot{U}_2|^2 - |\dot{U}_1|^2) = k (|\dot{U}_2 - \dot{I}_{2z'}|^2 - |\dot{U}_1 - \dot{I}_{1z'}|^2), \quad (11-37)$$

где $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$ — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$; $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ — составляющие прямой и обратной последовательностей напряжений $\dot{U}_{AB}$ и $\dot{U}_{BC}$ и токов $\dot{I}_{AB}$ и $\dot{I}_{BC}$.

Как следует из (11-37), условием работы реле является неравенство $|\dot{U}_2 - \dot{I}_{2z'}|^2 > |\dot{U}_1 - \dot{I}_{1z'}|^2$, при котором $M_3 > 0$. Это выражение показывает, что при всех симметричных режимах реле не работает, так как составляющие U_2 и I_2 в этих режимах равны нулю. Выражение (11-37) облегчает анализ работы реле, позволяет вести его аналитически.

Рассмотренное реле может применяться в качестве направленного дистанционного органа от двухфазных к. з. между любыми фазами. Для такого реле не требуется пусковой орган, так как оно не реагирует на нагрузку. Отечественной промышленностью выпускалось реле типа КРС-121, основанное на описанном принципе.

11-8. ТОЧНОСТЬ РАБОТЫ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТОК ТОЧНОЙ РАБОТЫ

Точность работы реле сопротивления характеризуется погрешностью $\Delta z = z_y - z_{c.p.}$, которая показывает, насколько действительное $z_{c.p.}$ отличается от уставки реле z_y .

Основными причинами, вызывающими погрешность в работе реле и появление зависимости $z_{c.p.}$ от тока, являются: во-первых, наличие механического момента $M_{мех}$ и других факторов, ограничивающих чувствительность конструкций, и, во-вторых, нелинейность магнитопроводов и выпрямителей в цепях реле.

На рис. 11-24 показан характер зависимости $z_{c.p.}$ от тока I_p и возникающей при этом погрешности Δz .

При отсутствии механического момента и других факторов, ограничивающих чувствительность реле, характеристика срабатывания не зависит от тока I_p и изображается прямой 1 ($z_{c.p.} = z_y$). Действительная характеристика реле представляется кривой 2 .

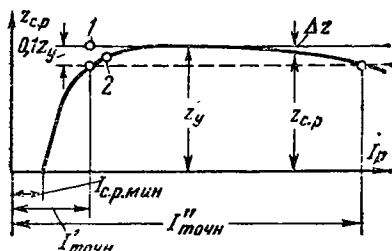


Рис. 11-24. Зависимость $z_{c.p.}$ от тока в реле.

1 — идеальная характеристика; 2 — действительная характеристика.

Рассмотрим ее особенности. При $z_{c.p.} = 0$, имеющем место при $U_p = 0$, реле срабатывает только при определенном значении тока $I_{с.р. мин}$, который должен в этом случае преодолеть сопротивление механического момента и других факторов, обуславливающих конечную чувствительность реле.

При малых токах I_p , соизмеримых с величиной $I_{с.р. мин}$, погрешности реле особенно велики. Это объясняется большим значением погрешности Δz , обусловленной механическим моментом.

По мере увеличения тока I_p значение погрешности Δz уменьшается и в средней части характеристики погрешность становится настолько мала, что ею можно пренебречь, считая, что $z_{c.p.} = z_y$.

При больших значениях I_p начинают проявляться насыщение магнитопроводов и нелинейность выпрямителей, в результате чего погрешность Δz снова нарастает, а $z_{c.p.}$ уменьшается.

Из кривой 2 следует, что *каждое реле сопротивления может работать с достаточной точностью только в определенном диапазоне токов I_p* . Принято, что для дистанционных реле погрешность Δz_p не должна превышать 10%.

Из этого условия по кривой $z_{c.p.} = f(I_p)$ определяются токи точной работы реле $I'_{точен}$ и $I''_{точен}$, при которых погрешность равна 10%, а $z_{c.p.} = 0,9z_y$.

В современных конструкциях ток точной работы в начальной части характеристики $I'_{точен}$ составляет 1—7А.

При выборе уставок реле сопротивления необходимо проверять, что при к. з. в конце зоны действия реле $I_{к.з.мин} \geq I'_{точн}$, а $I_{к.з.макс} \leq I'_{точн}$.

Если эти условия не будут выполнены, то погрешность реле превышает 10%.

11-9. ДИСТАНЦИОННЫЕ ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ

а) Требования к схемам включения

Дистанционные органы, выполняемые с помощью реле сопротивления, должны включаться на ток и напряжение сети по таким схемам, при которых сопротивление z_p на зажимах реле пропорционально расстоянию l_k до места повреждения и не зависит от вида к. з.

Для выполнения поставленных условий напряжение U_p должно равняться падению напряжения до точки к. з. $I_{к.з} z_k$, а ток I_p — току $I_{к.з}$, тогда

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{I_{к.з} z_k}{I_{к.з}} = z_k = z_y l_k.$$

Исходя из этого *дистанционные органы включаются на напряжение и ток петли к. з.* Для обеспечения правильного действия дистанционных органов при двухфазных к. з. нужно установить три органа, реагирующие на повреждения между фазами АВ, ВС и СА. Применяются схемы и с одним дистанционным органом, но в этом случае его нужно переключать на напряжение и токи соответствующих фаз в зависимости от того, какие из них повреждены.

Схемы включения, обеспечивающие при междуфазных к. з. пропорциональность между z_p и l_k , оказываются непригодными в условиях замыканий на землю. Поэтому реле, реагирующие на междуфазные к. з., и реле, предназначенные для защиты от однофазных повреждений, включаются по разным схемам, рассмотренным ниже. Реле, определяющие удаленность места к. з. не по сопротивлению, а по косвенным признакам, как, например, КРС-121, включаются по особым схемам.

б) Включение дистанционных органов, реагирующих на междуфазные к. з.

Включение на междуфазные напряжения и разность фазных токов осуществляется согласно табл. 11-1.

Такой способ включения (рис. 11-25) полностью отвечает поставленным выше условиям, в чем можно убедиться, определив сопротивления на зажимах реле при различных видах междуфазных к. з.

При трехфазном к. з. (рис. 11-26, б) все три дистанционных органа находятся в одинаковых условиях.

К каждому из них подводится междуфазное напряжение, равное $\sqrt{3}U_{\phi}$. Фазное напряжение U_{ϕ} равно падению напряжения в проводе фазы от места установки реле до точки к. з.

Отсюда напряжение

$$U_p^{(3)} = \sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1K} = \sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1y} l_K,$$

где $I_K^{(3)}$ — ток трехфазного к. з., проходящий по фазе; z_{1K} — сопротивление прямой последовательности фазы от места установки реле до точки K ; l_K — расстояние до места повреждения; z_{1y} — удельное сопротивление прямой последовательности фазы на 1 км.

Ток в каждом реле равен геометрической разности токов двух фаз, т. е. $I_p = \sqrt{3} I_K^{(3)}$, следовательно, сопротивление на зажимах каждого реле

$$z_p^{(3)} = \frac{U_p^{(3)}}{I_p^{(3)}} = \frac{\sqrt{3} I_K^{(3)} z_{1K}}{\sqrt{3} I_K^{(3)}} = z_{1K} = z_{1y} l_K.$$

Рис. 11-25. Схема включения дистанционных органов.

При двухфазном к. з., например, между фазами B и C (рис. 11-26, в) только один дистанционный орган, включенный на напряжение между поврежденными фазами B и C , получает напря-

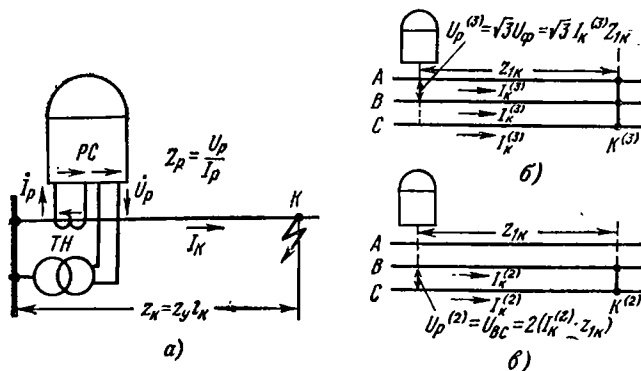


Рис. 11-26. Короткое замыкание на защищаемой линии.

а — схема сети; б — токи и напряжения поврежденных фаз при трехфазном к. з.; в — при двухфазном к. з.

жение, пропорциональное расстоянию l_K . Это напряжение равно падению напряжения в петле к. з., т. е. в фазах B и C , поэтому

$$U_p^{(2)} = U_{BC} = 2 I_K^{(2)} z_{1K}.$$

Ток $I_p^{(2)} = \dot{I}_B - \dot{I}_C = 2\dot{I}_A$. Отсюда находим:

$$z_p^{(2)} = \frac{U_p^{(2)}}{I_p^{(2)}} = \frac{U_{BC}}{I_B - I_C} = \frac{2I_K z_{1K}}{2I_K} = z_{1K} = z_{1Y} l_K.$$

При к. з. на фазах AB и CA $z_p^{(2)}$ находится аналогично и будет также равняться $z_{1K} = z_{1Y} l_K$.

Пользуясь аналогичным методом, можно показать, что и при двухфазных к. з. на землю

$$z_p^{(1,1)} = z_{1K} = z_{1Y} l_K.$$

Таким образом, при всех видах междуфазных к. з. сопротивление на зажимах реле равно сопротивлению прямой последовательности фазы z_{1K} . Следовательно,

$$z_p \equiv l_K \quad \text{и} \quad z_p^{(3)} = z_p^{(2)} = z_{1K},$$

как это и требуется по заданным условиям.

Включение на междуфазное напряжение и фазный ток осуществляется согласно табл. 11-2. Анализируя эту схему, можно убедиться, что при трехфазных к. з. $z_p^{(3)} = \sqrt{3} z_{1K}$, а при двух-

Таблица 11-2

Второй способ

Дистанционное реле фаз	I_p	U_p
AB	I_A	U_{AB}
BC	I_B	U_{BC}
CA	I_C	U_{CA}

фазных — в той же точке $z_p^{(2)} = 2z_{1K}$. Таким образом, данная схема, удовлетворяя первому из заданных условий $z_p \equiv l_K$, не обеспечивает второго условия, так как $z_p^{(3)} \neq z_p^{(2)}$.

Поэтому схема включения на междуфазное напряжение и фазный ток используется лишь для дистанционных органов третьей

зоны, которые обычно совмещаются с пусковыми органами защиты (см. § 11-12). В этом случае нестабильность третьих зон при различных видах к. з. допустима, поскольку третьи зоны являются резервными и работают только при отказе основной защиты.

При обеих схемах включения в случае двухфазного к. з. (рис. 11-26, в) из трех дистанционных органов правильно определяет удаленность повреждения только один, включенный на напряжение между поврежденными фазами.

Например, при к. з. между B и C (рис. 11-25, 11-27), сопротивление на реле II $z_p = z_{1K}$, а на зажимах реле I и III z_p получается преувеличенным, так как подводимые к ним напряжения U_{AB} и U_{CA} (рис. 11-27) превышают напряжение U_{BC} , а питающий их ток (без учета нагрузки) в 2 раза меньше, чем ток $\dot{I}_B - \dot{I}_C$ в реле II . Эти реле ведут себя так, как если бы к. з. произошло дальше действительного места повреждения. Поэтому они не могут вызвать неселективного действия защиты.

Способы включения дистанционных органов на разность токов двух фаз в современных защитах основаны на использовании вспомогательных трансформаторов тока *ВТ* или трансреакторов *ТР* с двумя первичными обмотками 1 и 2 (рис. 11-28). Каждая первичная обмотка включается на ток соответствующей фазы (например, *А* и *В*), так чтобы наводимые ими потоки в сердечнике *ВТ* или *ТР* были направлены встречно и создавали результирующий поток

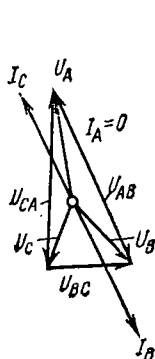


Рис. 11-27. Векторная диаграмма токов и напряжений в месте установки защиты при двухфазном к. з. на фазах *ВС*.

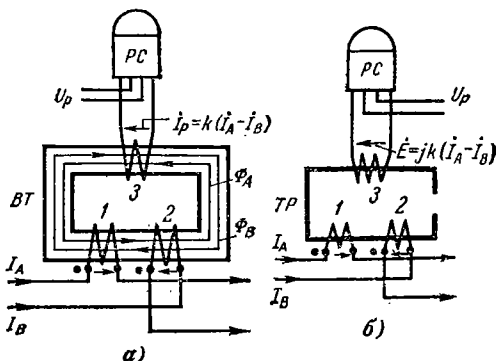


Рис. 11-28. Включение дистанционных органов на разность токов двух фаз.

а — с помощью вспомогательного трансформатора *ВТ*;
б — с помощью трансреактора *ТР*.

$\Phi_p = \Phi_1 - \Phi_2$, пропорциональный разности токов, питающих первичные обмотки *ВТ* или *ТР*. При этом условии ток вторичных обмоток 3 (или их э. д. с.) будет также пропорционален разности указанных первичных токов.

В защитах, выпускаемых отечественной промышленностью, применяется схема на рис. 11-28, *б*.

в) Включение дистанционных органов, реагирующих на однофазные к. з.

Дистанционные органы, предназначенные для определения удаленности мест однофазных к. з., включаются по так называемой схеме с токовой компенсацией (рис. 11-29, *а*). Схема предусматривает три реле сопротивления, каждое из которых включается согласно табл. 11-3 на напряжение $\dot{U}_\phi$ фаз *А*, *В* и *С* и ток

$$\dot{I}_p = \dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0,$$

где $\dot{I}_\phi$ — ток той же фазы, что и напряжение U_ϕ ; $k3\dot{I}_0$ — ток, пропорциональный току нулевой последовательности.

Коэффициент пропорциональности $k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1}$.

При таком значении k сопротивление на зажимах реле при однофазных к. з. $z_{с.р} = \frac{\dot{U}_\Phi}{\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0}$ получается равным z_1 — сопротивлению прямой последовательности до места к. з.

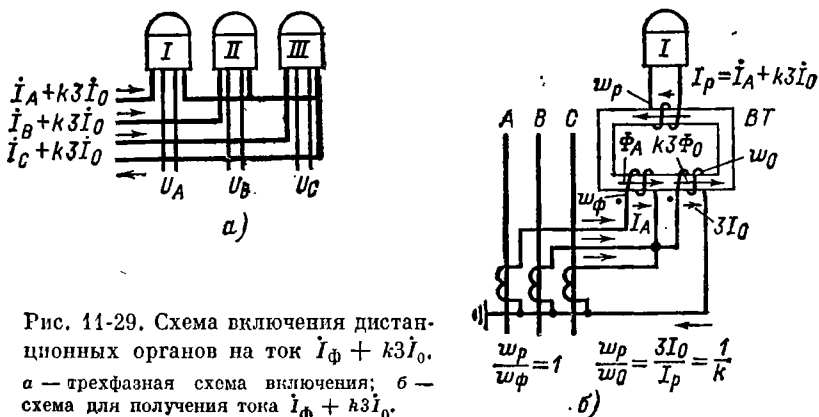


Рис. 11-29. Схема включения дистанционных органов на ток $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$. а — трехфазная схема включения; б — схема для получения тока $\dot{I}_\Phi + k3\dot{I}_0$.

Для доказательства того, что выбранная схема компенсации обеспечивает $z_p = z_1$, рассмотрим однофазное к. з. (рис. 11-30), например на фазе А. Согласно табл. 11-3 сопротивление на зажимах реле фазы А

$$z_p = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_A + k3\dot{I}_0}. \quad (11-38)$$

Напряжение фазы А в месте установки защиты (в точке Р) $\dot{U}_A = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0$. Каждая составляющая U_1, U_2, U_0 , в точке Р равна сумме напря-

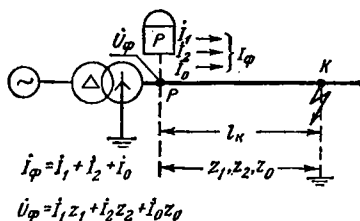


Рис. 11-30. Однофазное к. з.

Таблица 11-3

Реле фаз	Напря- жение	Ток
А	U_A	$\dot{I}_A + k3\dot{I}_0$
В	U_B	$\dot{I}_B + k3\dot{I}_0$
С	U_C	$\dot{I}_C + k3\dot{I}_0$

жения соответствующей последовательности в точке К и падения напряжения той же последовательности на участке КР. Отсюда

$$\dot{U}_A = (\dot{U}_{1K} + \dot{I}_1 z_1) + (\dot{U}_{2K} + \dot{I}_2 z_2) + (\dot{U}_{0K} + \dot{I}_0 z_0),$$

где $\dot{U}_{1K}, \dot{U}_{2K}, \dot{U}_{0K}$ — напряжения прямой, обратной и нулевой последовательностей в точке К; $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ — симметричные составляющие тока к. з.; $z_1,$

z_2, z_0 — сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей участка КР.

Учитывая, что на поврежденной фазе $\dot{U}_{1K} + \dot{U}_{2K} + \dot{U}_{0K} = 0$, получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_1 z_1 + \dot{I}_2 z_2 + \dot{I}_0 z_0. \quad (11-39)$$

Прибавляя и отнимая в правой части уравнения (11-39) $I_0 z_1$ и учитывая, что для линий сопротивление $z_1 = z_2$ и что для фазы А сумма

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0 = \dot{I}_A,$$

получаем:

$$\dot{U}_A = \dot{I}_A z_1 + \dot{I}_0 (z_0 - z_1); \quad (11-39a)$$

подставляя полученное значение $\dot{U}_A$ в (11-38), получаем:

$$z_p = \frac{z_1 \left[\dot{I}_A + \left(\frac{z_0 - z_1}{3z_1} \right) 3\dot{I}_0 \right]}{\dot{I}_A + k3\dot{I}_0}. \quad (11-40)$$

Принимая

$$k = \frac{z_0 - z_1}{3z_1},$$

получаем:

$$z_p = z_1 = z_{1y} l_{p.к.} \quad (11-41)$$

Выражение (11-41) справедливо для замыкания на землю как одной фазы, так и двух фаз. Таким образом, *сопротивление на зажимах реле, включенного по схеме с токовой компенсацией, пропорционально расстоянию до места к. з. l_k и не зависит от вида замыкания на землю и от соотношения токов I_0 и I_ϕ .*

Поэтому схема с токовой компенсацией полностью отвечает требованиям, предъявляемым к дистанционным органам, и получила всеобщее распространение.

При однофазном к. з. правильно работает только одно реле, включенное на напряжение и ток поврежденной фазы. Два других реле, включенные на ток и напряжение неповрежденных фаз, имеют $z_p > z_1$, что не вызывает неселективного действия.

При включении реле на фазный ток и напряжение без токовой компенсации (рис. 11-30) с учетом (11-39a) получим, что

$$z_p = \frac{U_\phi}{I_\phi} = z_1 + \frac{I_0}{I_\phi} (z_0 - z_1).$$

В этом случае $z_p \neq z_1$ и имеет нестабильное значение, зависящее от отношения I_0/I_ϕ .

Для выполнения токовой компенсации часто применяется схема, приведенная на рис. 11-29, б. Реле питается током через промежуточный трансформатор или трансреактор ТР с двумя первичными обмотками. Одна из них w_ϕ включена на ток фазы I_ϕ , а вторая w_0 — на ток $3I_0$. Их число витков подбирается так, чтобы отношение $w_\phi/w_0 = 1/k$. Результирующий поток первичных обмоток $\dot{\Phi}_{рез} = \dot{\Phi}_\phi + k\dot{\Phi}_0 \equiv I_\phi + k3I_0$, поэтому вторичный ток трансформатора или вторичная э. д. с. трансреактора будут пропорциональны току $I_\phi + k3I_0$.

Коэффициент k является величиной комплексной, поскольку z_0 и z_1 могут иметь различные углы (соотношения x и r). Поэтому токи $3I_0$ и $k3I_0$

должны иметь соответствующий сдвиг по фазе. Учитывая, однако, что угловой сдвиг между z_0 и z_1 невелик, им без большой погрешности пренебрегают, как это сделано в рассмотренной схеме. Обычно $k < 1$.

г) Условия работы дистанционных органов при двойных замыканиях на землю

В сети с малым током замыкания на землю дистанционные защиты должны реагировать на междуфазные к. з. и их дистанционные органы включаются на междуфазные напряжения и разность фазных токов. Как указывалось, в таких сетях возможны двойные замыкания на землю (рис. 11-31). *Защита в этом случае должна отключать только одно место повреждения.*

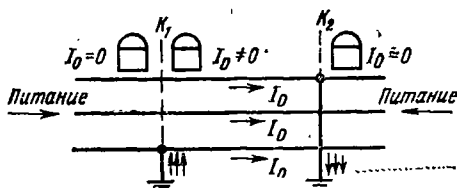


Рис. 11-31. Условия работы дистанционных органов при двойном к. з. на землю.

На участке между двумя точками повреждения дистанционные органы включены на фазное напряжение по схеме с токовой компенсацией, а на участке между точкой повреждения и источником питания — на линейное напряжение и разность фазных токов. Для этого дистанционные органы нормально и при отсутствии I_0 включены на линейное напряжение и разность фазных токов. При появлении тока нулевой последовательности, всегда возникающего на участке между точками замыкания на землю (K_1 и K_2), дистанционные органы, установленные на этом участке, автоматически переключаются на напряжение фазы и ток $\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0$.

Исследование условий работы дистанционных защит при двойных замыканиях на землю показывает, что они не могут обеспечить четкого выполнения этого требования.

Наилучшие результаты получаются, если на участке

11-10. УПРОЩЕННЫЕ СХЕМЫ С УМЕНЬШЕННЫМ ЧИСЛОМ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

а) Трехсистемные и односистемные схемы включения дистанционных органов

Дистанционные реле относятся к числу сложных реле, в связи с этим были разработаны схемы, позволяющие уменьшить количество дистанционных органов в защите.

Описанные в § 11-9 способы включения дистанционных органов были рассчитаны на три реле. Схемы с тремя органами называются **т р е х с и с т е м н ы м и**.

С целью упрощения можно применять схемы с одним дистанционным органом (**о д н о с и с т е м н ы е**). В односистемных схемах для правильной работы дистанционных органов их необ-

ходимо автоматически переключать на напряжения и токи соответствующих фаз в зависимости от того, на каких из них возникло повреждение. Так, например, в односистемной схеме при двухфазном к. з. между фазами A и B к дистанционному органу должны подводиться напряжение U_{AB} и ток $\dot{I}_A - \dot{I}_B$, при к. з. между B и $C - U_{BC}$ и $\dot{I}_B - \dot{I}_C$.

При двойных замыканиях в разных точках сети с малым током замыкания на землю на участке, где $I_0 = 0$, к реле должны подводиться те же токи и напряжения, что и в предыдущем случае, а на участке, где $I_0 \neq 0$, реле должно включаться на фазное напряжение $\dot{U}_\phi$ и ток $\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0$ согласно табл. 11-3.

Указанные переключения производятся с помощью промежуточных реле, управляемых пусковыми органами защиты.

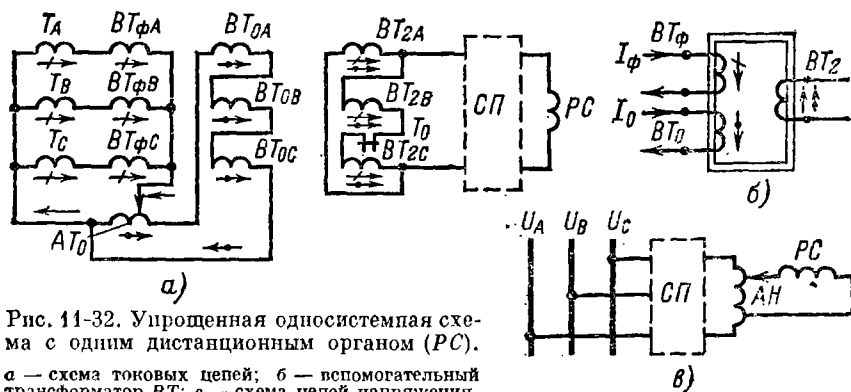


Рис. 11-32. Упрощенная односистемная схема с одним дистанционным органом (РС).
 а — схема токовых цепей; б — вспомогательный трансформатор ВТ; в — схема цепей напряжения.

Для этого каждое пусковое реле должно работать только при повреждении на определенных фазах. Такое свойство пусковых органов называется избирательностью.

На рис. 11-32 показана упрощенная односистемная схема с переключениями в цепях тока и напряжения дистанционного органа защиты (РС). Эта схема применяется в защите, предназначенной для сети с малым током замыкания на землю.

Для облегчения работы контактов переключающих реле при больших токах к. з. 50—100 А токовые цепи реле РС питаются через вспомогательные понизительные трансформаторы тока ВТ (рис. 11-32). Каждый из этих трансформаторов имеет две первичные обмотки ВТ_ф и ВТ₀ и одну вторичную ВТ₂. Обмотка ВТ_ф питается током I_ϕ соответствующей фазы, а обмотка ВТ₀ током I_0 , получаемым через автотрансформатор АТ₀.

Ток первичных обмоток I_ϕ и ток I_0 трансформируются во вторичную обмотку ВТ₂, в последней появляется ток

$$I_2 = \frac{\dot{I}_\phi + k3\dot{I}_0}{n_{ВТ}}.$$

При междуфазных к. з. без земли $I_0 = 0$, в этом случае ток $I_2 = I_\Phi / n_{BT}$.

Коэффициент трансформации n_{BT} обычно принимается равным 25. В результате трансформации токи, питающие реле PC , уменьшаются в 25 раз, что весьма существенно облегчает работу контактов промежуточных реле, производящих переключения в токовых цепях PC .

Обмотки BT_{2A} , BT_{2B} и BT_{2C} соединены в треугольник, цепь которого проходит через нормально замкнутый контакт токового реле T_0 , реагирующего на ток $3I_0$. При междуфазных к.з. реле T_0 не работает и при действии пусковых реле поврежденных фаз к PC подводится разность токов двух поврежденных фаз, получаемых от соответствующих обмоток BT_2 (для упрощения чертежа схема переключений $СП$ на рис. 11-32 не показана).

При двойном замыкании на землю появляется ток I_0 , реле T_0 срабатывает и в зависимости от положения контактов пусковых реле к PC подводится сумма тока поврежденной фазы и тока компенсации $k3I_0$, получаемых от соответствующей обмотки BT_2 .

Переключения в цепях напряжения реле PC (рис. 11-32, *в*) выполняются также с помощью пусковых реле. Они производят необходимые переключения в цепях напряжения дистанционного органа так, чтобы к автотрансформатору $АН$ подводилась разность напряжений поврежденных фаз в случае междуфазного к. з. и напряжение поврежденной фазы при двойных замыканиях на землю. Одностисменные схемы получили значительное распространение. Более подробно они рассмотрены в [Л. 13, 23, 44].

б) Использование одного комплекта дистанционных органов для нескольких зон

Наиболее часто один комплект дистанционных органов используется для первой и второй зоны. Это позволяет в 2 раза уменьшить число дистанционных органов в защите и поэтому широко применяется на практике.

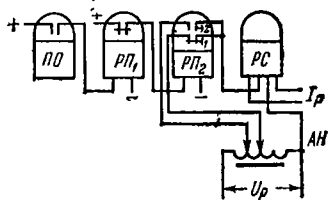


Рис. 11-33. Схема с одним комплектом реле сопротивления для первой и второй зоны.

Схемы с использованием одного комплекта реле сопротивления для двух зон основаны на том, что нормально дистанционные органы включены с уставкой первой зоны; при к. з. за пределами первой зоны уставка реле автоматически изменяется с первой на вторую зону. Изменение уставки осуществляется пусковыми реле после истечения времени, необходимого для действия первой зоны. На рис. 11-33 приведена типовая схема (для одной фазы), осуществляющая автоматическое изменение уставки на дистанционном органе. Нормально к реле сопротивления PC подво-

дится ток I_0 , реле T_0 срабатывает и в зависимости от положения контактов пусковых реле к PC подводится сумма тока поврежденной фазы и тока компенсации $k3I_0$, получаемых от соответствующей обмотки BT_2 .

дится напряжение, соответствующее уставке первой зоны, от автотрансформатора $АН$ через нижний размыкающий контакт 2 промежуточного реле $РП_2$. Это реле непрерывно питается током через размыкающий контакт промежуточного реле $РП_1$, управляемого пусковым органом защиты $ПО$.

При к. з. пусковое реле $ПО$ приходит в действие и реле $РП_1$ размыкает цепь обмотки реле $РП_2$. Последнее работает (отпадает) с выдержкой времени около 0,15 с, достаточной для действия первой зоны, и переключает реле $РС$ на отвлечение $АН$, соответствующее уставке второй зоны. Если к. з. было в первой зоне, то $РС$ срабатывает до того, как $РП_2$ переключит его уставку. Если к. з. произошло за пределами первой зоны, то после переключения уставки $РС$ получит возможность действовать с уставкой второй зоны.

11-11. ПРИЧИНЫ, ИСКАЖАЮЩИЕ РАБОТУ ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

На работу дистанционных органов оказывают воздействие некоторые факторы, искажающие величины z_p так, что при этом нарушается пропорциональность между z_p и расстоянием l_k до места к. з. Эти искажения необходимо учитывать при выборе уставок во избежание нарушения селективности и недопустимого сокращения зон действия защиты.

а) Влияние переходного сопротивления

Переходное сопротивление в месте к. з. (рис. 11-34) обуславливается главным образом появлением электрической дуги, имеющей активное сопротивление r_d . Сопротивление на зажимах реле $РС$ при электрической дуге в месте повреждения при двухфазном

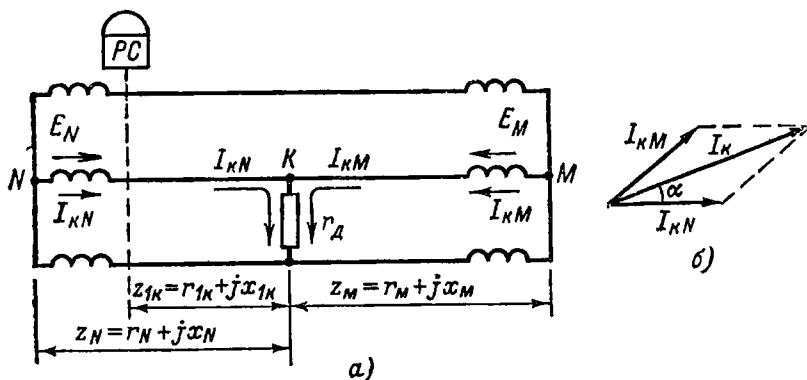


Рис. 11-34. Влияние электрической дуги в месте к. з. на сопротивление z_p , z_{1K} , r_{1K} , x_{1K} — сопротивление линии между точкой K и местом установки защиты.

к. з., как это видно из рис. 11-34, равно:

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = \frac{2\dot{I}_{KN}z_1 + \dot{I}_{KR}r_d}{2\dot{I}_{KN}} = z_1 + \frac{\dot{I}_{KR}r_d}{2\dot{I}_{KN}} = z_{1K} + \Delta z, \quad (11-42)$$

где z_{1K} — сопротивление прямой последовательности до места к. з.; r_d — сопротивление электрической дуги; $\dot{I}_{KN}$ — ток к. з. от источника питания N , проходящий через реле; $\dot{I}_K$ — ток к. з., протекающий через дугу, равный $\dot{I}_{KN} + \dot{I}_{KM}$; $\Delta z = \dot{I}_{KR}r_d$, при этом

$$\dot{I}_K = \frac{\dot{I}_K}{2\dot{I}_{KN}}.$$

В общем случае из-за подпитки места повреждения с противоположной стороны током $I_{KM} \Delta z > r_d$ и сдвинуто относительно него на угол α , равный углу сдвига между векторами $\dot{I}_K$ и $\dot{I}_{KN}$. Сдвиг по фазе между $\dot{I}_{KM}$ и $\dot{I}_{KN}$, обуславливающий сдвиг на угол α между токами $\dot{I}_K$ и $\dot{I}_{KN}$, возникает вследствие несовпадения фаз между э. д. с. $\dot{E}_N$ и $\dot{E}_M$, различия углов сопротивления z_N и z_M и различия в соотношениях симметричных составляющих токов $\dot{I}_{KN}$ и $\dot{I}_{KM}$. С учетом сказанного из выражения (11-42) следует, что реле полного сопротивления воспринимают появление переходного сопротивления как удаление действительного места к. з. на величину Δz .

В результате этого зона действия реле сокращается и возникает возможность отказа защиты в конце расчетной зоны и неселективной работы предыдущих защит. Величина сопротивления дуги не поддается точной оценке.

В начальный момент повреждения длина электрической дуги минимальна, в дальнейшем дуга удлиняется, вследствие чего сопротивление r_d возрастает. Поэтому на защиту с выдержкой времени дуга оказывает большее влияние, чем на защиты, действующие мгновенно.

б) Влияние токов подпитки от промежуточных подстанций

В ряде случаев между местом установки защиты и точкой повреждения оказываются включенными источники питания N , дающие дополнительный ток I_{KN} к месту к. з. (рис. 11-35, а). Этот ток не проходит через реле, но, создавая дополнительное падение напряжения в сопротивлении поврежденного участка, увеличивает напряжение на зажимах реле, а вместе с током I_p .

Напряжение на реле с учетом подпитки равно:

$$U_p = I_{KM}z'_{1\lambda} + (I_{KM} + I_{KN})z''_{1K}.$$

Ток в реле

$$I_p = I_{KM},$$

отсюда

$$z_p = \frac{U_p}{I_p} = z'_{1л} + \frac{I_{KM} + I_{KN}}{I_{KM}} z''_{1к} = z'_{1л} + k_p z''_{1к}. \quad (11-43)$$

Коэффициент $k_p = \frac{I_{KM}}{I_{KM}} > 1$ называется коэффициентом распределения (или подпитки¹).

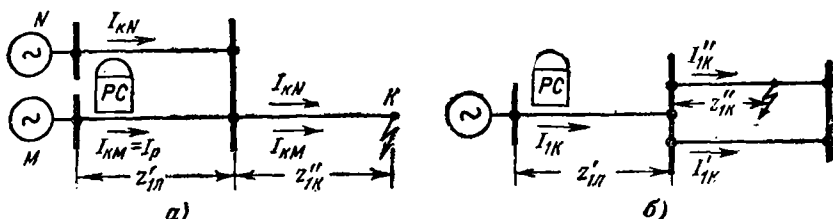


Рис. 11-35. Искажение замеров дистанционных органов.

а — вследствие подпитки токами к. з.; б — вследствие разветвления токов к. з.

При наличии подпитки сопротивление на зажимах реле оказывается большим, чем действительное сопротивление прямой последовательности до места к. з., что приводит к сокращению зоны торвых и третьих ступеней защиты. Чем больше ток подпитки I_{KN} , тем больше искажается (увеличивается) сопротивление z_p .

в) Влияние разветвления токов при сочетании одинарной линии с параллельными

При сочетании одинарной линии с двумя параллельными (рис. 11-35, б) линиями реле, установленное на одинарной линии, замеряет преуменьшенное сопротивление при к. з. на одной из параллельных линий. В этом случае

$$U_p = [I_{1к} z'_{1л} + (I_{1к} - I'_{1к}) z'_{1к}]; \quad I_p = I_{1к}.$$

Следовательно,

$$z_p = z'_{1л} + \frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} z'_{1к} = z'_{1л} + k_p z'_{1к}, \quad (11-44)$$

где k_p — коэффициент разветвления токов:

$$k_p = \frac{I_{1к} - I'_{1к}}{I_{1к}} < 1.$$

Влияние подпитки и разветвлений должно учитываться при расчете уставок дистанционных защит.

¹ В расчетах для учета подпитки часто пользуются коэффициентом токораспределения $k_T = \frac{I_{KM}}{I_K}$, тогда $z_p = z'_{1л} + \frac{z'_{1к}}{k_T}$.

г) Влияние погрешности измерительных трансформаторов

Погрешность трансформаторов тока уменьшает вторичный ток по сравнению с его расчетным значением, что вызывает сокращение зон действия защиты. Угловая погрешность искажает величину угла φ_p сопротивления z_p и влияет таким образом на работу направленных реле сопротивления, у которых $z_{с.р} = f(\varphi_p)$. Для ограничения искажений в работе измерительных органов трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, должны проверяться по кривым предельной кратности, которым соответствует полная погрешность, не превышающая 10%, и удовлетворять им при максимальном значении тока к. з. в конце первой зоны.

Погрешность трансформаторов напряжения по коэффициенту трансформации велика. Однако величина вторичного напряжения может заметно искажаться за счет падения напряжения в соединительных проводах, связывающих реле с трансформатором напряжения. Подбором сечения соединительных проводов эти искажения сводятся к минимальному значению. Угловая погрешность трансформаторов напряжения влияет на работу реле так же, как и трансформаторов тока.

11-12. ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

а) Функции и типы пусковых реле и требования к ним

В односистемных дистанционных защитах и в защитах с одним комплектом дистанционных (измерительных) органов на две зоны необходимы пусковые органы, подготавливающие схему к правильной работе при к. з. Пусковые органы в этих защитах выполняют следующие функции:

1. Пускают реле времени второй, третьей и, если есть, четвертой зон.

2. В схемах с одним комплектом измерительных органов для первой и второй зон, автоматически изменяют сопротивление срабатывания измерительных органов с первой зоны на вторую (см. § 11-10, б).

3. В односистемных схемах подводят при к. з. к измерительным органам токи и напряжения поврежденных фаз (см. § 11-10, а).

4. Действуют в качестве резервной зоны защиты.

В трехсистемных защитах с самостоятельными комплектами измерительных органов для каждой зоны, выполненных с помощью направленных реле сопротивления, специальных пусковых органов не требуется.

В этих схемах никаких переключений в цепях измерительных органов не производится. Измерительные органы отстроены от нагрузки. Пуск реле времени осуществляется измерительными

органами соответствующей зоны. В качестве резервной (третьей) зоны служит дополнительный комплект измерительных органов.

В защитах, использующих для определения зоны реле реактивного сопротивления (такие защиты широко применялись раньше в СССР), самостоятельный пусковой орган является обязательным. Реле реактивного сопротивления реагируют на нагрузку и поэтому нуждаются в органе, разрешающем их работу только при к. з.

Пусковые органы должны удовлетворять трем основным требованиям. Они должны обладать достаточной чувствительностью при к. з., иметь надежную отстройку от максимальной нагрузки и по возможности не действовать при качаниях. Выполнение этих требований является трудной в техническом отношении задачей.

В качестве пусковых реле дистанционной защиты применяются главным образом токовые реле и реле сопротивления. Оба типа пусковых реле должны быть отстроены от нагрузки, что ограничивает чувствительность защиты при к. з., особенно на длинных и сильно загруженных линиях. В связи с этим нашли применение реле сопротивления со смещенной круговой, эллиптической и овальной характеристиками, а также особые блокирующие реле (называемые иногда «шорами» или фазоограничителями) и реле с характеристикой в виде четырехугольника. Блокирующие реле применяются в сочетании с пусковыми реле и позволяют ограничить их действие при перегрузках, что дает возможность повысить чувствительность защиты при к. з. Токовые реле и реле сопротивления реагируют на качания и не полностью отвечают требованиям к пусковым реле. Поэтому защиты с подобными пусковыми реле дополняются блокировками от качаний.

Наиболее рациональной характеристикой пускового реле сопротивления является характеристика, показанная на рис. 11-7, *е* в виде заштрихованного четырехугольника $OABC$, обеспечивающая надежное действие защиты с учетом сопротивления дуги в пределах выбранной зоны действия (участок линии OA). Для обеспечения надежного действия при к. з. характеристика срабатывания реле должна охватывать заштрихованную площадь $OKK'K''$ (на рис. 11-6, *д*).

При такой характеристике реле не действует при $z_p > z_{к.з.}$ и поэтому возможность ложной работы защиты при перегрузках и качаниях сводится к минимуму.

б) Токовые пусковые реле

Токовые пусковые реле, включенные на фазные токи. Токовые реле при большой кратности токов к. з. обладают четкой избирательностью как при двухфазных, так и однофазных повреждениях, потому что в обоих случаях они действуют только на тех фазах, где протекает ток к. з.

В защитах от междуфазных к. з. пусковые токовые реле достаточно устанавливать на двух фазах, что позволяет обеспечить их действие при всех видах междуфазных повреждений и необходимую избирательность в односистемных и двухсистемных схемах дистанционных защит.

Главный недостаток токового пуска состоит в том, что он реагирует на токи нагрузки и качаний так же, как и на к. з.

Ток срабатывания пусковых реле приходится отстраивать от тока максимальной нагрузки. Поэтому в сетях 110 кВ и выше и особенно на длинных электропередачах с большой нагрузкой токовый пуск оказывается недостаточно чувствительным.

Токовые пусковые реле проще остальных пусковых устройств, поэтому их следует применять во всех случаях, когда они обеспечивают надежную чувствительность и отстройку от максимальной нагрузки. Наибольшее применение токовый пуск находит в дистанционных защитах сети 35 кВ.

Токовые реле обратной последовательности. В некоторых схемах дистанционных защит в качестве пускового органа применяется токовое реле, включенное через фильтр обратной последовательности.

Двухфазные к. з. сопровождаются появлением тока обратной последовательности, и реле надежно действует. При трехфазных к. з. $I_2 = 0$, но практически все трехфазные к. з. возникают как однофазные или двухфазные повреждения, переходящие затем в трехфазные. Поэтому чтобы обеспечить пуск защиты от реле обратной последовательности при трехфазных к. з., предусматривается особая схема, **ф и к с и р у ю щ а я** (запоминающая) кратковременное или длительное появление I_2 в первый момент возникновения повреждения. Эта схема рассмотрена в § 13-4 (рис. 13-4 и 13-5).

П р е и м у щ е с т в о м пуска I_2 является недействие его при симметричных перегрузках и качаниях, а также высокая чувствительность при к. з., поскольку $I_{с.р}$ реле обратной последовательности отстраивается только от $I_{нб}$ фильтра, имеющего небольшую величину. **Н е д о с т а т к о м** реле I_2 является действие при качаниях и нагрузке, если они сопровождаются появлением несимметрии (I_2 и U_2).

в) Пусковые реле сопротивления

Схемы включения. Схемы включения реле на ток и напряжение сети должны обеспечивать: надежный пуск защиты при к. з. на защищаемой линии и резервируемом участке сети, наилучшую избирательность поврежденных фаз и стабильность зоны действия. Исходя из этих требований, пусковые реле сопротивления — не-направленные и направленные, с круговыми и эллиптическими характеристиками включаются на междуфазные напряжения и

разность одноименных фаз токов согласно табл. 11-1 или на междофазные напряжения и ток одной фазы по табл. 11-2.

Первая схема (табл. 11-1) обеспечивает стабильность зоны действия при всех видах к. з. (см. § 11-19, б), что очень важно, когда пусковые реле выполняют функции дистанционного органа третьей зоны защиты. Однако эта схема не обеспечивает избирательности поврежденных фаз. При двухфазных к. з. (рис. 11-36, а) все три реле питаются током к. з. и имеют пониженное напряжение, поэтому при близких к. з. они могут сработать все одновременно, что не позволяет выявлять поврежденные фазы по действию пусковых реле.

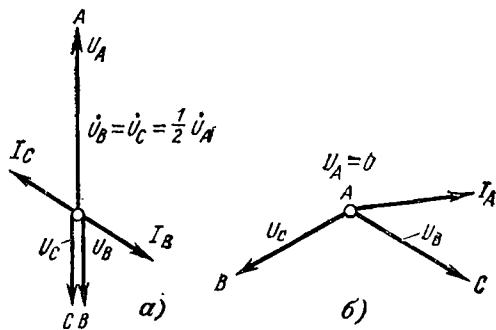


Рис. 11-36. Векторные диаграммы при к. з. а — двухфазном; б — однофазном.

С учетом этого первая схема включения должна применяться как лучшая с точки зрения стабильности зон во всех дистанционных защитах, не требующих избирательного пуска.

Вторая схема (см. § 11-19, б, табл. 11-2) не обеспечивает стабильности зоны действия реле при разных видах к. з., но позволяет с некоторыми дополнениями обеспечить избирательность и поэтому применяется в тех защитах, где это свойство необходимо (например, в односистемных схемах).

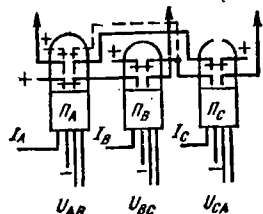


Рис. 11-37. Схема взаимной циклической блокировки пусковых реле сопротивления.

Сама схема включения не дает достаточно четкой избирательности при двухфазных к. з. Так, например (рис. 11-36), при к. з. на фазах В и С должно работать реле, включенное на напряжение U_{BC} и ток I_B . Однако при близких к. з. может также подействовать и реле, включенное на U_{CA} и I_C , поскольку $U_{CA} = 1,5U_{\phi}$ (рис. 11-36, а), т. е. меньше нормального, равного $1,73U_{\phi}$, а ток $I_C = I_{к.з}$. Для обеспечения четкой избирательности может вводиться взаимная блокировка между пусковыми реле (рис. 11-37).

Контакты пусковых реле соединяются попарно, например Π_A и Π_B , Π_B и Π_C , Π_C и Π_A , как показано на рис. 11-37. При такой схеме в случае двухфазного к. з. цепь пуска создается только одним реле, включенным на напряжение петли к. з. Так, при к. з. между фазами В и С сработает реле Π_B , включенное на U_{BC} и ток I_B , и заблокирует действие реле Π_C , которое питается током к. з., протекающим по фазе С, не позволяя ему сработать.

все четыре квадранта комплексной плоскости. Реле действует во время качаний при всех значениях $z_{p. \text{ кач}} < z_{c. p}$ независимо от угла φ_p .

Так как на длинных линиях пусковые реле имеют относительно большие сопротивления $z_{c. p}$, то реле на этих линиях оказываются очень восприимчивыми к качаниям. Таким образом, можно сделать вывод, что *ненаправленные реле не могут служить для защиты длинных и сильно нагруженных линий как по условиям чувствительности при к. з., так и по условиям отстройки от качаний.*

Ненаправленные реле применяются в качестве пусковых органов в сетях 35 кВ и на недлинных и мало нагруженных линиях в сети 110 кВ.

По сравнению с токовыми пусковыми реле ненаправленное реле сопротивления отличается большей чувствительностью к к. з., так как оно реагирует не только на увеличение тока, но и на снижение напряжения.

Пусковые направленные реле сопротивления с круговой характеристикой. Характеристика 2 направленного реле (рис. 11-38) значительно лучше удовлетворяет требованиям, предъявляемым к пусковым реле, чем ненаправленное реле с характеристикой 1. Это объясняется тем, что величина $z_{c. p}$ направленного реле зависит от угла φ_p , а рабочая зона характеристики относительно невелика и расположена в основном в первом квадранте комплексной плоскости. Благодаря этому реле обладает при к. з. большей чувствительностью, чем при нагрузке, и в меньшей степени реагирует на качания.

Действительно, при металлических к. з. угол φ_p сопротивления на зажимах реле $z_{p. k}$ равен углу сопротивления линии и составляет $65-80^\circ$, т. е. близок к $\varphi_{m. ч}$ реле. Поэтому при к. з. реле работает с наибольшей чувствительностью и зоной действия $z_{c. p} = z_{c. p. \text{ макс}}$ (вектор AC).

В режиме нагрузки с передачей большой активной мощности по защищаемой линии угол сопротивления $z_{p. \text{ раб. мин}}^*$ меньше, чем при к. з., он колеблется в пределах $10-40^\circ$. При этих углах $z_{c. p}$ реле уменьшается на 20—50% по отношению к $z_{c. p. \text{ макс}}$, что следует из чертежа и уравнения срабатывания реле

$$z_{c. p} = z_{c. p. \text{ макс}} \cos(\varphi_{m. ч} - \varphi_p).$$

Такое загрузление реле при $\varphi_p = \varphi_{\text{нагр}}$ позволяет допускать большие нагрузки на линии по сравнению с ненаправленным реле. Это наглядно показано на рис. 11-38, где совмещены характеристики направленного и ненаправленного реле сопротивления 1 и 2, обладающие одинаковой чувствительностью при к. з. (вектор AC).

При качаниях направленное реле сопротивления может действовать, только когда вектор $z_p = z_{\text{кач}}$ попадает в рабочую зону реле, которая в основном ограничена первым квадрантом. Если $z_{\text{кач}}$ находится за пределами первого квадранта, то работа

реле невозможна. Таким образом, направленное реле отстроено от качаний значительно лучше, чем ненаправленное.

Недостатком направленного реле является мертвая зона по напряжению, так как реле не работает при $U_p = 0$ или значениях, близких к нему. Этот недостаток при двухфазных к. з. устраняется применением подпитки реле напряжением третьей фазы.

Для устранения мертвой зоны при трехфазных к. з. устанавливается токовая отсечка или производится смещение характеристики реле в сторону третьего квадранта, последнее допустимо, поскольку третья зона защиты работает с выдержкой времени.

Для устранения мертвой зоны можно применять небольшое смещение характеристики относительно начала координат вдоль оси максимальной чувствительности AC , в сторону III квадранта.

При к. з. через сопротивление дуги r_d направленное реле допускает меньшее сопротивление, чем ненаправленное, что видно

из рис. 11-38 ($r_d'' < r_d'$). Однако, как показывает опыт, чувствительность направленных реле оказывается достаточной для безотказного отключения повреждений с переходным сопротивлением.

Направленные реле с круговой характеристикой получили широкое применение в качестве пусковых органов в сетях 110—220—330—500 кВ. Их применение особенно целесообразно на длинных и сильно загруженных линиях электропередачи.

Пусковые направленные реле с эллиптической характеристикой. Характеристика реле 1 показана на рис. 11-39,

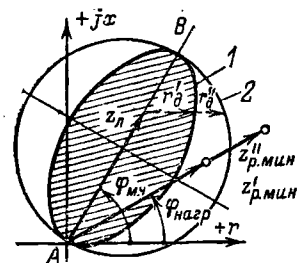


Рис. 11-39. Эллиптическая характеристика срабатывания и ее сравнение с круговой.

с ней совмещена для сравнения характеристика 2 направленного реле, имеющая вид окружности.

Обе характеристики имеют одинаковую зону действия (отрезок AB) при к. з. с углом $\varphi_p = \varphi_{м.ч}$.

Но при $\varphi_p \neq \varphi_{м.ч}$ реле с эллиптической характеристикой имеют меньшую область действия, чем реле с круговой характеристикой. Поэтому они несколько лучше отстраиваются от нагрузки и имеют меньшую возможность срабатывания при качаниях.

Реле с эллиптической характеристикой допускают значительно меньшее переходное сопротивление r_d в месте к. з., чем реле с круговой характеристикой. Это является недостатком эллиптической характеристики, который нужно учитывать при выборе малой оси эллипса. Реле имеет мертвую зону при двухфазных и трехфазных к. з., которая устраняется так же, как и у реле с круговой характеристикой.

г) Реле сопротивления с блокировкой, ограничивающей действие защиты при перегрузке

Еще большее улучшение характеристики пускового реле можно получить, применив комбинированный пуск, состоящий из направленного реле сопротивления и блокирующего реле сопротивления смешанного типа (рис. 11-40, а). Характеристика 2 реле смешанного типа выражается уравнением

$$z_{c.p} = \frac{k}{\cos(\varphi_p - \delta)}$$

и представляет собой прямую линию под углом $90^\circ + \delta$ к оси r . Величина k в уравнении реле является проекцией векторов $z_{c.p}$ на

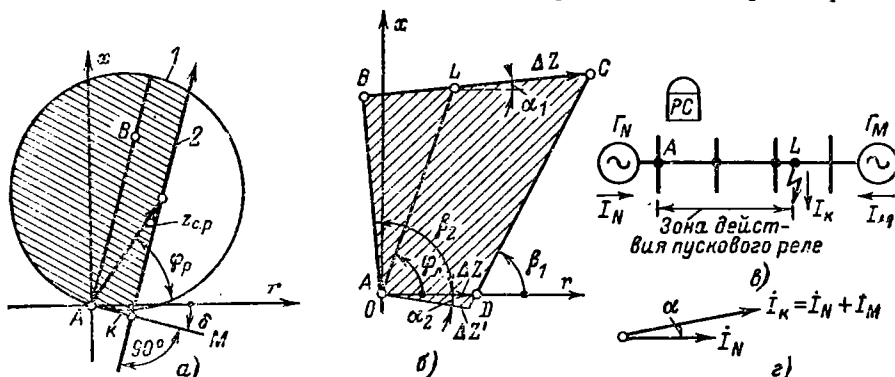


Рис. 11-40. Характеристика комбинированного пускового органа, состоящего из направленного реле сопротивления 1 и блокирующего реле сопротивления 2.

перпендикуляр AM и имеет постоянное значение. На рис. 11-40, а зона действия этого реле заштрихована. Блокирующее реле отсекает часть характеристики 1 реле сопротивления, ненужную для работы защиты при к. з. Благодаря этому вероятность неправильной работы при качаниях и перегрузке сводится к минимуму.

Сочетанием направленного реле сопротивления и двух блокирующих реле, отсекающих правую и левую части характеристики 1, можно достигнуть дальнейшего улучшения характеристики пускового устройства.

В качестве блокирующего реле можно использовать обычные реле мощности с углом внутреннего сдвига 60° и 30° .

Пусковое реле с характеристикой в виде четырехугольника. Характеристика реле показана на рис. 11-40, б. Площадь четырехугольника $ABCD$ должна быть минимальной, но обеспечивающей работу реле в пределах выбранной зоны действия. Исходя из этого, характеристика реле должна удовлетворять следующим условиям:

Для обеспечения направленности действия точка A характеристики должна совпадать с началом координат — точкой O .

Прямая BC должна проходить через точку L , соответствующей концу расчетной зоны действия реле (рис. 11-40, а).

Прямая AL представляет характеристику сопротивления защищаемой линии и образует с осью r угол φ_L , равный углу полного сопротивления линии z_L . Точка C выбирается из условия действия реле при к. з. в конце защищаемой зоны (т. е. в точке L) при наличии переходного сопротивления r_d в месте повреждения. Как указывалось в § 11-11, а,

$$z_{AC} = z_{AL} + \frac{I_K}{I_N} r_d = z_{AL} + \Delta z. \quad (11-44a)$$

С учетом угла α , сдвига фаз между векторами $\dot{I}_K = \dot{I}_N + \dot{I}_M$ и $\dot{I}_N$ прямая BC должна проходить относительно оси r под углом $\alpha_1 = \alpha + \alpha_{\text{зап}}$, где $\alpha_{\text{зап}}$ — угол запаса, учитывающий угловую погрешность измерительных трансформаторов и погрешность в срабатывании реле. Сторона CD должна быть смещена относительно отрезка AL на величину Δz , характеризующую дополнительное сопротивление, обусловленное электрической дугой r_d . При приближении места к. з. к точке A ток I_K возрастает, в результате этого r_d и Δz будут уменьшаться. С учетом этого угол β_1 принимается меньше угла защищаемой линии φ_L . Сторона AD по величине должна равняться $\Delta z'$, которое определяется сопротивлением r_d электрической дуги при к. з. в начале линии (точка A), и должна иметь угол $\alpha_2 = \alpha + \alpha_{\text{зап}}$. Сторона AB располагается под углом $\beta_2 > \varphi_L$ с таким расчетом, чтобы реле надежно действовало при металлических к. з. на защищаемом участке линии (прямая AL) с учетом погрешности измерительных трансформаторов и реле. Полученная характеристика реле $ABCD$ обеспечивает необходимую чувствительность при к. з. и имеет наилучшую отстройку от нагрузки и качаний по сравнению с другими характеристиками, обладающими равной чувствительностью при к. з. Реле с рассмотренной характеристикой могут быть получены с помощью двух реле: одного — с характеристикой BAD и другого — с BCD , или одного реле на полупроводниковых элементах. Для устранения мертвой зоны и улучшения резервирования при к. з. на длинных электропередачах можно применять смещение характеристики относительно начала координат.

11-13. СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

а) Классификация схем

Схемы дистанционных защит можно классифицировать по их назначению, типам дистанционных органов и принципам построения. По назначению схемы подразделяются на схемы защит от междуфазных к. з., от замыканий на землю и от всех видов повреждений. По типу дистанционных органов в различаются схемы с дистанционными реле полного и реак-

тивного сопротивления. По виду характеристики схемы подразделяются на двухступенчатые и трехступенчатые, и, наконец, по способам построения схемы можно разделить в зависимости от числа дистанционных органов в каждой зоне защиты на три группы: трехсистемные (с тремя дистанционными органами на зону), двухсистемные (с двумя дистанционными органами) и односистемные (с одним дистанционным органом на зону).

В Советском Союзе применяются главным образом схемы с дистанционными органами, реагирующими на полное сопротивление z_p и его угловой сдвиг φ_p , в качестве защиты от междуфазных к. з. Дистанционные защиты от замыканий на землю в СССР не применяются, поскольку от этого вида повреждения в сети 110 кВ и выше успешно используются более простые токовые направленные защиты нулевой последовательности со ступенчатой характеристикой.

Реактансные защиты вследствие сложности их схем и отсутствия существенных преимуществ распространения в СССР не получили.

б) Общие принципы выполнения схем дистанционных защит

Дистанционная защита может применяться в качестве основной защиты или резервной. В первом случае она должна выполняться трехступенчатой, обеспечивая посредством первой и второй зоны защиту линии с минимальными выдержками времени и с помощью третьей зоны — резервирование защиты следующего участка. Во втором случае защита выполняется трехступенчатой, если резервная защита должна дублировать основную защиту, и по упрощенному варианту с двумя или одной ступенью, если ее задача сводится к резервированию защиты следующего участка и основной защиты своей линии без соблюдения требования быстродействия.

В качестве дистанционных (измерительных) органов в современных схемах защит используются главным образом направленные реле с характеристикой в виде окружности или эллипса, проходящих через начало координат или смещенных относительно него в III и I квадранты.

Перспективными являются реле с характеристикой в виде четырехугольника, изображенной на рис. 11-7, е. Как было показано в § 11-12, эти характеристики обеспечивают наибольшую чувствительность при к. з. и лучшую отстройку от токов нагрузки и качаний.

Ненаправленные дистанционные органы с круговой характеристикой в сочетании с органами направления мощности применяются в односистемных схемах для защиты сетей 35 кВ. В целях упрощения для первой и второй зон, как правило, используется один комплект дистанционных органов с переключением уставки с первой на вторую зону (см. § 11-10, б).

В схемах дистанционных защит, установленных на участках сети, где возможны качания, при которых защита может сработать неправильно, предусматривается специальное блокирующее устройство (см. § 13-2), исключающее действие защиты в этом режиме.

Все реле сопротивления могут неправильно работать при исчезновении напряжения, вызванном неисправностями во вторичных цепях трансформаторов напряжения. Поэтому в схемах предусматривается блокировка (см. § 6-4), снимающая оперативный ток с защиты в случае неисправности в цепях напряжения. При токовых пусковых органах блокировка не ставится, поскольку токовые пусковые органы не позволяют работать защите в нормальном режиме. В этом случае достаточно иметь сигнал об исчезновении напряжения в цепях защиты.

В Советском Союзе распространены трехсистемные и односистемные схемы. Трехсистемные защиты отличаются от односистемных большей простотой и четкостью схемы, большей надежностью и быстротой действия вследствие отсутствия в них переключений в цепях тока и напряжения.

Трехсистемные схемы. В качестве примера, иллюстрирующего принцип выполнения трехсистемных защит, на рис. 11-41 приведена схема двухступенчатой дистанционной защиты, не предназначенная для резервирования следующего участка сети. Схема имеет три направленных измерительных органа первой зоны PC_1 и три таких же органа второй зоны PC_2 .

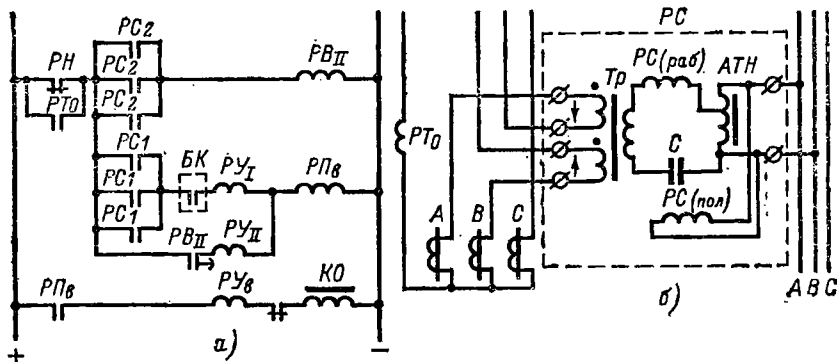


Рис. 11-41. Трехсистемная двухступенчатая дистанционная защита.

а — схема оперативных цепей; б — схема цепей переменного тока одного реле.

Измерительные органы жестко включены на междуфазные напряжения и разность токов соответствующих фаз.

Поскольку защита выполняется без третьей зоны, а ее дистанционные реле обладают направленностью, отстроены от нагрузки и не требуют никаких переключений в своих цепях, пусковые реле и реле направления мощности становятся излишними, поэтому эти органы в рассматриваемой схеме отсутствуют. Схема оперативных цепей защиты (рис. 11-41, а) очень проста. При к. з. в пределах первой зоны дистанционные реле PC_1 соответствующих фаз приходят в действие и замыкают цепь выходного промежуточного реле $РП_В$, последнее срабатывает, подавая импульс на отключение выключателя.

При к. з. во второй зоне действуют дистанционные органы PC_2 , пуская реле времени $PВ_{II}$. По истечении установленной на нем выдержки времени контакты $PВ_{II}$ замыкаются и замыкают цепь реле PP_B . При действии защиты выпадают флажки соответствующих указательных реле: $PУ_I$ или $PУ_{II}$ и $PУ_A$.

Во избежание неправильного действия защиты при обрыве в цепях напряжения, питающих реле PC , в схеме предусмотрена блокировка при помощи реле PH . При повреждении в цепях напряжения реле PH выводит защиту из действия, снимаемая с нее плюс. Реле PH реагирует и на к. з. с землей в первичной сети; чтобы сохранить защиту в действии при подобных повреждениях, установлено реле PT_0 , питающееся током нулевой последовательности. При замыканиях на землю реле PT_0 шунтирует контакты реле PH , сохраняя, таким образом, плюс на защите (см. гл. 6).

Блокировка защиты при качаниях осуществляется контактами BK , замыкающимися только при к. з. Схема цепей переменного тока защиты приведена на рис. 11-41, 6. На схеме показан один дистанционный орган типа КРС-131, включенный на $\dot{U}_p = \dot{U}_{AB}$ и $\dot{I}_p = \dot{I}_A - \dot{I}_B$; остальные включаются аналогично.

В [Л. 81] рассмотрена защита ПЗ-2, предназначенная для сетей 110—330 кВ. Защита состоит из двухступенчатой защиты ДЗ-2, к которой добавлена третья ступень, обеспечивающая резервирование следующих участков сети. Третья зона выполняется с помощью трех направленных реле сопротивления КРС-1. Защита имеет три направленных дистанционных органа, построенных на схемах сравнения на выпрямленном токе.

Двухсистемные схемы (рис. 11-42). В Советском Союзе была разработана и широко применялась двухсистемная схема дистанционной защиты типа ПЗ-158 и ПЗ-159. В этой схеме один дистанционный орган $PC^{(3)}$ (КРС-131) служил для определения удаленности к. з. при трехфазных к. з. и второй $PC^{(2)}$ типа КРС-121 — для действия при двухфазных к. з. Цени тока и напряжения подводились к обоим реле жестко без переключений.

В качестве пусковых реле $ПО$ и дистанционного органа третьей зоны использовались направленные реле сопротивления КРС-131. Защита имела блокировку от качаний и блокировку от исчезновения напряжения. Упрощенная схема защиты приведена на рис. 11-42.

Односистемные защиты. Завод ЧЭАЗ выпускает односистемную защиту типа ПЗ-1 с реле мощности и сопротивления на выпрямленных токах. Защита предназначена для сети 35 кВ. Она имеет токовые пусковые реле, один дистанционный орган, выполненный по схеме сравнения, на выпрямленном токе и орган направления мощности на кольцевой фазочувствительной схеме. Ток и напряжение к дистанционному органу и органу направления мощности подводятся с помощью промежуточных реле, управляемых токовыми пусковыми реле защиты. Защита имеет три ступени времени.

Схема защиты подробно рассматривается в [Л. 81 и 97].

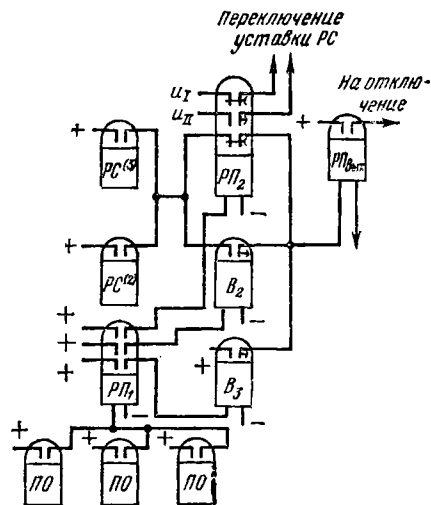


Рис. 11-42. Упрощенная схема двухсистемной защиты типа ПЗ-158. Блокировки от качаний и исчезновения напряжения не показаны.

а) Бесконтактные схемы на статических элементах

Любая защита состоит из реагирующих (измерительных) органов *ИО* и логической части *ЛЧ*, на выходе которой устанавливается выходное реле $P_{\text{вых}}$, посылающее команду на отключение выключателя (рис. 11-43).

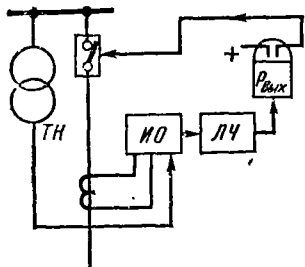


Рис. 11-43. Структурная схема релейной защиты.

В защитах на полупроводниковых элементах с помощью последних выполняются как измерительные органы, так и логическая часть, в результате чего схема защиты получается **бесконтактной**.

Бесконтактные схемы, выполненные на надежных элементах, обладают большей надежностью и требуют меньшего ухода, чем многоконтактные схемы с электромеханическими реле. Этими принципиальными преимуществами бесконтактных схем объясняется имеющаяся тенденция к их внедрению в релейной защите.

В бесконтактных схемах применяются единичные контактные реле в качестве выходных реле $P_{\text{вых}}$ защиты и т. д. В последнее время для этой цели пытаются использовать как более надежные и малогабаритные герметичные, магнитоуправляемые, безъякорные реле (**герконы**) [Л. 108].

Устройство основных реагирующих органов на полупроводниках (реле тока, мощности, сопротивления) было разобрано выше. Теперь кратко рассмотрим общие вопросы по выполнению логической части схем с помощью полупроводниковых элементов.

б) Логические элементы и выполняемые ими операции

Логическая часть защиты воспринимает сигналы основных органов, реагирующих на состояние сети, и по определенной предусмотренной схемой программе в зависимости от характера и сочетания поступивших сигналов производит операции, обеспечивая действие или недействие защиты.

Логическую часть сложных защит можно подразделить на несколько составных элементов, выполняющих отдельные простейшие операции. На вход такого простейшего логического элемента *ЛЭ*, условно изображенного на рис. 11-44, подаются сигналы, которые при определенном сочетании вызывают появление выходного сигнала. Под сигналами в бесконтактных схемах на полу-

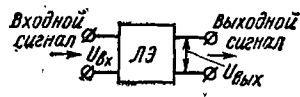


Рис. 11-44. Логический элемент.

проводниках подразумевается появление или изменение напряжения на зажимах логических элементов. Если логический элемент не работает, то напряжение на его выходе $U_{\text{вых}}$ равно нулю или меньше заданного значения $U_{\text{с.р.}}$. При действии элемента $U_{\text{вых}} \neq 0$ или больше $U_{\text{с.р.}}$. Обычно каждый сигнал обозначается определенной буквой и ему приписываются два условных цифровых значения: 0 и 1. Нуль означает отсутствие сигнала, а единица — его появление.

Такое обозначение используется для условной записи логических функций, характеризующих зависимость выходного сигнала от входных [Л. 82—87]. Для облегчения проектирования разработана теория проектирования и анализа сложных логических схем, основанная на использовании математических дисциплин, в частности алгебры логики [Л.105].

Логические схемы релейной защиты относительно просты и пока не требовали применения подобных методов анализа. Однако наименование основных логических операций и формы их записи были заимствованы из алгебры логики и стали применяться при рассмотрении бесконтактных схем защиты.

В схемах релейной защиты используются в основном три простейших логических операции, условно названные (как и в алгебре логики) ИЛИ, И, НЕ. Каждая из этих операций может выполняться с помощью контактных и бесконтактных элементов.

Схема, осуществляющая операцию ИЛИ, показана на рис. 11-45. Сигналы на входе обозначены A , B и C , а выходной сигнал — буквой X . Сигнал X на выходе схемы ИЛИ возникает при появлении хотя бы одного входного сигнала: или A , или B , или C .

На рис. 11-45, б приведена контактная схема, выполняющая операцию ИЛИ. Контакты электромеханических реле A , B и C соединяются в этом случае параллельно. При срабатывании любого из них появляется выходной сигнал, поступающий на следующий элемент схемы. В защите эта операция очень распространена. Например, по схеме ИЛИ выполняется пуск любой защиты (рис. 11-45, б). В этом случае реле A , B , C — пусковые.

Бесконтактная схема ИЛИ применяется в аналогичных случаях и может выполняться с помощью активных сопротивлений, диодов или триодов. Схема ИЛИ на активных сопротивлениях r показана на рис. 11-45, в. При отсутствии напряжения $U_{\text{вх}}$, или, иначе говоря, входных сигналов на зажимах A , B и C сопротивлений r , напряжение $U_X = 0$. Это означает, что выходного сигнала нет.

При подаче напряжения $U_{\text{вх}}$ хотя бы на один входной зажим A , или B , или C появляется напряжение $U_X = U_{\text{вх}} - Ir$, т. е. возникает выходной сигнал.

Схема с диодами (рис. 11-45, г) работает аналогично. При отсутствии входных сигналов выходной сигнал U_X также отсутствует. В случае появления положительного сигнала (напряжения) на одном из диодов A , или B , или C последний открывается и на его

выходе в точке X возникает положительный сигнал $U_X = U_{вх} - I r_d$, где I и r_d — ток и сопротивление открытого диода.

На рис. 11-45, б приведена схема **ИЛИ** на диодах, применяемая в тех случаях, когда в точке X нормально дежурит положительное напряжение $+E$. Подобные условия имеют место, если элемент **ИЛИ** подает сигнал на триод усилителя. При подаче отрицательного напряжения $U_{вх}$ на один из зажимов A , или B , или C соответствующий диод открывается и на выходе схемы (на зажиме X) появляется отрицательное напряжение $U_X = U_{вх} - I r_d$. Во всех рассмотренных схемах в сопротивлении элемента **ИЛИ** (r или r_d)

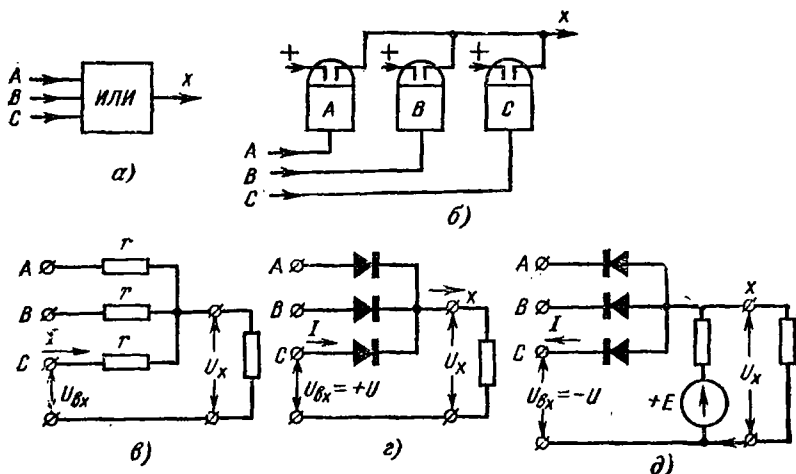


Рис. 11-45. Логическая схема **ИЛИ**.

а — условное изображение; б — контактная схема; в — на активных сопротивлениях; г и д — на полупроводниковых диодах

теряется часть энергии, подводимой к входу элемента. За счет этого мощность выходного сигнала получается меньше входного, происходит ослабление сигнала.

Схемы на триодах не рассматриваются, так как они применяются редко.

В алгебре логики операция **ИЛИ** называется также логической суммой и обозначается знаком «+» или $\vee$. Она записывается в общем виде уравнением: $A + B + C = X$, где «+» читается как **ИЛИ**. Условное изображение элемента **ИЛИ**, применяемое в структурных схемах, приведено на рис. 11-45, а.

Схемы, выполняющие операцию **И** (рис. 11-46). Сигнал X на выходе этой схемы возникает только при одновременном появлении сигналов на всех входах схемы (A и B на рис. 11-46). Подобная операция имеет место, например, в схеме максимальной направленной защиты, которая посылает импульс на реле времени, если сработает токовое реле и реле мощности, или в схеме дистан-

пционной защиты, которая приходит в действие, если сработают пусковой орган защиты и дистанционный, и т. д.

В контактных схемах операция *И* выполняется последовательным соединением контактов реле *A* и *B* (рис. 11-46, б).

Схема *И* с двумя входными сигналами *A* и *B*, построенная на диодах, показана на рис. 11-46, в. Нормально сигналы *A* и *B* отсутствуют. При появлении сигнала *A* в виде положительного напряжения U_{cA} диод D_1 открывается и по сопротивлению R_1 , R_2 проходит ток.

Потенциал точки *X* равен падению напряжения на R_2 , его величина мала и недостаточна для приведения в действие элемента, подключенного к выходу схемы *X*.

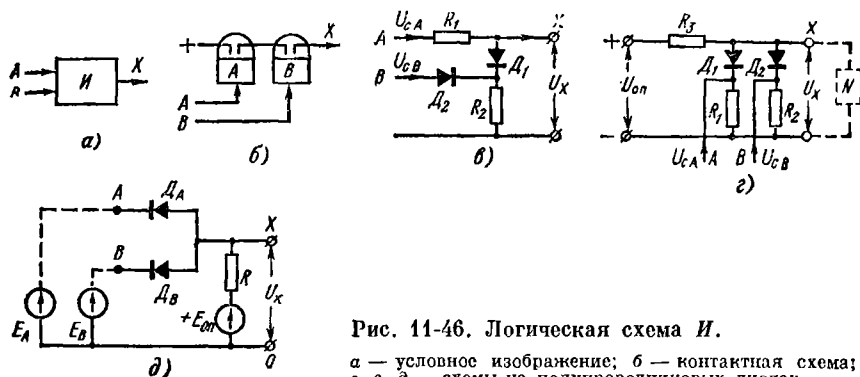


Рис. 11-46. Логическая схема *И*.

а — условное изображение; б — контактная схема; в, г, д — схемы на полупроводниковых диодах.

При появлении одного (положительного) сигнала *B* диод D_1 закрыт и не пропускает сигнал *B* в точку *X*. Если же сигналы *A* и *B* появятся одновременно, то сигнал *B* закроет диод D_1 , высокий положительный потенциал от сигнала *A* попадет в точку *X* и поступит на элемент, подключенный к выходу схемы.

Аналогично работает второй вариант схемы *И*, изображенной на рис. 11-46, г. При отсутствии сигналов *A* и *B* диоды D_1 и D_2 открыты. Выходное напряжение U_X равно падению напряжения в R_1 и R_2 , оно близко к нулю и недостаточно для действия элемента, подсоединенного к выходу схемы. При появлении одного из сигналов (*A* или *B*) напряжение U_X не меняется. Если же появятся два положительных сигнала *A* и *B* и величина каждого сигнала U_{cA} и $U_{cB} > U_{оп}$, то оба диода закроются и на выходе схемы появится напряжение $U_X = U_{оп}$, достаточное для действия элемента *N*.

В третьем варианте (рис. 11-46, д) напряжение U_X на выходе схемы (в точке *X*) появляется только при условии, что на все входные зажимы схемы *A* и *B* поданы напряжения положительного знака: E_A и $E_B > E_{оп}$. В этом случае диоды D_A и D_B заперты и $U_X = U_{оп}$. При появлении только одного сигнала, например

E_A , диод D_B , не имеющий сигнала, под действием $E_{оп}$ открыт и шунтирует выходные зажимы $X - 0$, поэтому напряжение $U_X = 0$ и выходной сигнал отсутствует.

Условное изображение схемы $И$ показано на рис. 11-46, а. В алгебре логики операция $И$ рассматривается как логическое умножение, обозначаемое знаком $\times$ или $\wedge$.

Условная запись этой операции имеет вид $A \times B = X$, где знак умножения $\times$ читается как $И$.

Схема, выполняющая операцию $НЕ$ или $НЕТ$ (рис. 11-47). При отсутствии входного сигнала A (рис. 11-47, а) на выходе схемы имеется сигнал X , при появлении входного сигнала A сигнал на выходе схемы исчезает. Сигнал X будет, если не будет сигнала A .

Примером операции $НЕ$ может служить схема блокировки защиты от исчезновения напряжения (рис. 11-47, б). Нормально

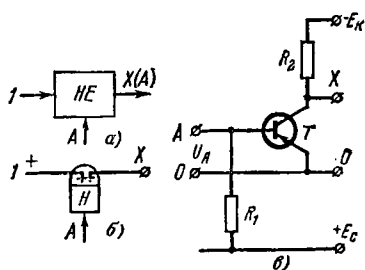


Рис. 11-47. Логическая схема $НЕ$.

а — условное изображение; б — контактная схема; в — схема на транзисторе.

через замкнутые контакты реле H на защиту подается плюс. В случае обрыва цепи напряжения (появляется сигнал A) реле H срабатывает, его контакты размыкаются и снимают плюс с защиты.

Аналогичная операция в бесконтактных схемах имеет много вариантов исполнения. На рис. 11-47, в показана схема $НЕ$, выполняемая с помощью транзистора T . Нормально на базу T подано положительное смещение. Триод T закрыт. На выходе схемы X под-

держивается отрицательное напряжение, поступающее через R_2 . При подаче на вход схемы A отрицательного сигнала триод открывается и шунтирует выход схемы. Напряжение в точке X падает до нуля (если принять, что сопротивление открытого триода $R = 0$). Условное изображение схемы $НЕ$ показано на рис. 11-47.

В алгебре логики операция $НЕ$ называется л о г и ч е с к и м о т р и ц а н и е м или и н в е р с и е й и записывается в виде уравнения $X = \bar{A}$.

Элемент $НЕ$ преобразует поступающий на вход сигнал на обратный по величине и знаку. Например, если на входе, т. е. на базе триода, сигнал отсутствует и положительным смещением ($+E_C$) триод заперт, то напряжение на выходе триода эмиттер — коллектор отлично от нуля, а зажим X имеет о т р и ц а т е л ь н ы й знак. Если же на вход подан о т р и ц а т е л ь н ы й потенциал $U_A \geq E_C$, то триод открыт, напряжение эмиттер — коллектор равно нулю и зажим X имеет п о л о ж и т е л ь н ы й потенциал, т. е. о б р а т н ы й в х о д н о м у. Это свойство элемента $НЕ$, выполненного на триоде, называют и н в е р т и р о в а н и е м с и г -

на л а, а сам элемент *НЕ* — инвертором. Такое название нельзя считать точным, так как в электротехнике инвертором называют устройство, преобразующее постоянный ток в переменный.

в) Дополнительные функциональные элементы логических схем

Кроме основных логических элементов *ИЛИ*, *И*, *НЕ* имеются дополнительные элементы. В качестве дополнительных элементов логических схем применяются: усилители сигналов; элементы замедления на срабатывание и возврат (осуществляющие функции реле времени и промежуточных реле замедленного действия); релейные элементы, реагирующие на появление сигнала; элементы памяти.

Усилители служат для увеличения мощности выходных сигналов до значения, необходимого для надежного действия элементов схемы, реагирующих на этот сигнал. Усилители применяются на выходе схем сравнения измерительных органов для обеспечения надежной работы реагирующего элемента и на выходе логических схем (*ИЛИ* и *И*) в активных сопротивлениях, в которых, как указывалось выше, теряется значительная мощность входящих сигналов.

В логических схемах обычно используются однокаскадные усилители с нормально открытым или закрытым транзистором. Для усиления сигнала в измерительных органах в большинстве случаев применяются двух- и трехкаскадные усилители.

Однокаскадный усилитель с нормально закрытым транзистором T_1 показан на рис. 11-48, а. Транзистор T_1 включен по схеме с общим эмиттером¹, так как эта схема по сравнению со схемами с общей базой и общим коллектором (рис. 11-48, в и г) обеспечивает наибольший коэффициент усиления по мощности.

На входные зажимы 1 и 2 (база — эмиттер) подается положительное относительно эмиттера напряжение смещения $+E_c$ и управляющий сигнал $U_{вх}$, противоположный по отношению к E_c полярности (рис. 11-48, а). Результирующее напряжение база — эмиттер

$$U_{\delta} = E_c - U_{вх}. \quad (11-45)$$

Коллектор транзистора с проводимостью *p-n-p* должен получать отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал $-E_k$, напряжение между коллектором и эмиттером $U_{\delta, к}$ является выходным напряжением усилителя и, как видно из схемы, равно:

$$U_{\delta, к} = U_{вых} = E_k - I_k R_k. \quad (11-46)$$

При $U_{вх} = 0$ на базу подается положительное смещение E_c , запирающее триод. В этом случае ток коллектора, питающий на-

¹ В этой схеме эмиттер непосредственно связан с входным 2 и с выходным 4 зажимом триода, т. е. является общим элементом входа и выхода схемы. Потенциал общих выводов 2, 4 условно принимается равным нулю.

грузку, $I_K = 0$, а коллекторное напряжение $U_K = -E_K$ (при этом потенциал точки 3 имеет отрицательный знак).

При появлении входного сигнала $U_{вх} > E_c$ напряжение на базе (база — эмиттер) согласно (11-45) становится отрицательным, триод T_1 открывается, в нагрузке R_K появляется ток коллектора I_K , выходное напряжение согласно (11-46) уменьшается и в пределе при полном открытии триода становится равным нулю, если пре-

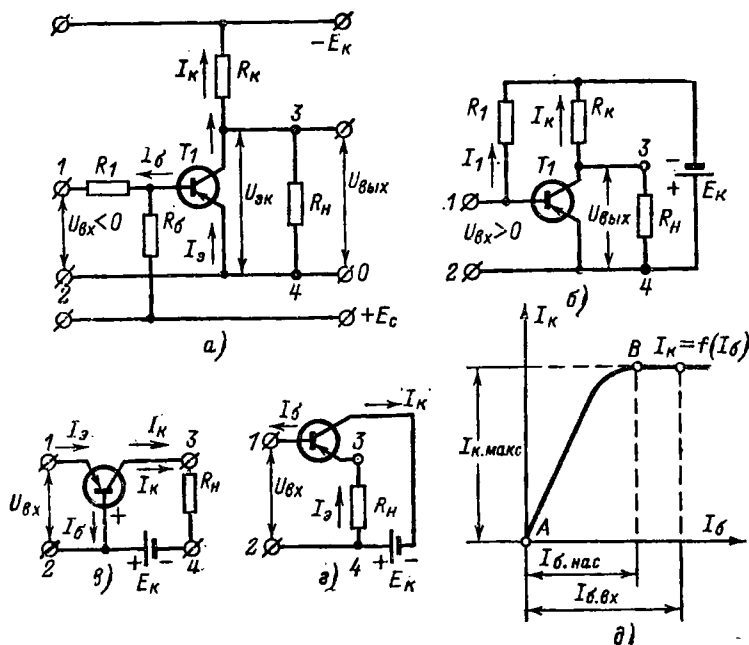


Рис. 11-48. Однокаскадный усилитель мощности.

а — с нормально открытым триодом типа p-n-p; б — с нормально закрытым триодом типа p-n-p; в — схема включения триода по схеме с общей базой; г — с общим коллектором; д — характеристика триода $I_K = f(I_б)$.

небрежь очень малым внутренним сопротивлением открытого триода. Величина коллекторного тока I_K будет меняться с изменением тока базы $I_б$ (или напряжения базы $U_б$) (рис. 11-48, д).

Эта характеристика показывает, что при $I_б = I_{б.нас}$ ток I_K достигает максимального значения ($I_{К.макс} = E_K/R_K$) и при дальнейшем росте $I_б$ не изменяется. Точке B соответствует (рис. 11-48, д) полное открытие триода. Этот режим называется режимом «насыщения».

Начальной точке A кривой $I_K = f(I_б)$ соответствует полное закрытие триода. Этот режим работы триода называется режимом «отсечки». В промежутке между точками A и B триод работает в режиме линейного усиления.

Усиление тока, осуществляемое усилителем, характеризуется коэффициентом усиления тока $\beta = I_k/I_b$. Величина β в зависимости от типа триода лежит в пределах от 10 до 100. Усиление по мощности определяется отношением выходной мощности $P_{\text{вых}} = I_k^2 R_{\text{вых}}$ к входной $P_{\text{вх}} = I_b^2 R_{\text{вх}}$ с учетом, что $I_k = \beta I_b$ получим коэффициент усиления по мощности:

$$k_M = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} = \beta^2 \frac{R_{\text{вых}}}{R_{\text{вх}}}.$$

Различают два режима работы усилителя: режим **линейного усиления**, при котором триод работает на прямолинейном участке AB кривой $I_k = f(I_b)$, и **ключевой режим**, когда триод нормально закрыт, а при появлении входного сигнала $U_{\text{вх}}$, которому соответствует $I_b > I_{b, \text{нас}}$, скачком переходит в режим насыщения и полностью открывается (рис. 11-48, ∂).

В этом режиме триод работает как ключ или контактное реле, замыкающее и размыкающее цепь нагрузки (рис. 11-48, ϵ). Поэтому такой режим работы усилителя называется **ключевым** или **релейным**. В схемах релейной защиты усилители обычно работают в ключевом режиме. Параметры усилителя, работающего в ключевом режиме, подбираются так, чтобы при появлении входного сигнала $U_{\text{вх}}$ (рис. 11-48, ∂) триод полностью открывался и давал на выходе ток $I_{k, \text{макс}}$.

Усилитель с нормально открытым триодом показан на рис. 11-48, δ . Нормально при отсутствии входного сигнала ($U_{\text{вх}} = 0$) триод T_1 открыт отрицательным напряжением (током), поданным через сопротивление R_1 на базу триода. Сопротивление триода в этом режиме равно нулю, и поэтому нагрузка R_n , подключенная на выходные зажимы 2 и 4, зашунтирована.

При появлении положительного сигнала, достаточного для закрытия триода, последний закрывается, нагрузка дешунтируется и на ней появляется напряжение $U_{\text{вых}} = \frac{E_k R_n}{R_k + R_n}$ и ток $I_n = U_{\text{вых}}/R_n$.

Двухкаскадные усилители. Принцип выполнения и работа двухкаскадного усилителя были рассмотрены в § 2.

Триггер¹. В бесконтактных схемах релейной защиты находят применение двухкаскадные усилители с положительной обратной связью, работающие в релейном режиме. Такие схемы, называемые **триггерами**, переходят из состояния недействия ($U_{\text{вых}} = 0$) в состояние работы ($U_{\text{вых}} = U$) мгновенно (скачкообразно), если входное напряжение достигает определенного значения: $U_{\text{вх}} \geq U_{\text{с.р.}}$. При снижении $U_{\text{вх}}$ до $U_{\text{воз}}$ выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ мгновенно падает до нуля и схема возвращается в исходное состояние.

¹ Триггер — (trigger), английское слово, означающее в переводе спусковое устройство, курок (ружья); образно характеризует принцип действия схемы.

Такая схема работает как обычное электромеханическое реле. Наряду с подобными самовозвращающимися схемами, называемыми схемами с одним устойчивым состоянием, применяются триггерные схемы с двумя устойчивыми состояниями, действующие так же, как и предыдущая схема. Она мгновенно переходит в новое состояние при появлении $U_{вх} \geq U_{с.р.}$, но остается в новом положении как угодно долго, пока не появится новый сигнал, возвращающий ее в первоначальное состояние. Подобные схемы позволяют фиксировать появление сигнала, «запомнить» его.

Имеется и третья разновидность — это схема с одним устойчивым состоянием, возвращающаяся в начальное положение через определенное время $t_{воз}$. Такие схемы используются в качестве элемента с замедленным возвратом, фиксирующего на некоторое время появление сигнала.

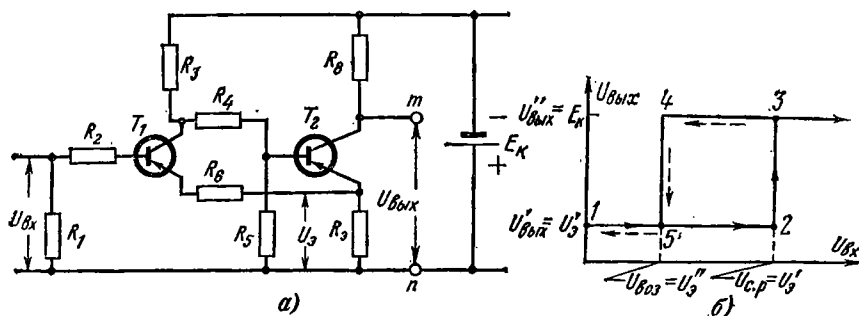


Рис. 11-49. Двухкаскадный усилитель, работающий в релейном режиме (триггер).

а — схема; б — диаграмма работы.

На рис. 11-49, а и б приведены схема и характеристика работы триггера с одним устойчивым состоянием и самовозвратом, выполняющего функции бесконтактного реле. Особенностью схемы является наличие обратной связи, осуществляемой с помощью сопротивления R_3 , через которое проходят эмиттерные токи $I_{э1}$ и $I_{э2}$ обоих триодов T_1 и T_2 .

Состояние схемы — не дей ст в и е, с р а б а т ы в а н и е, в о з в р а т — з а в и с я т, как уже было отмечено, от значения $U_{вх}$.

П р и $U_{вх} = 0$ триод T_1 закрыт, а T_2 под действием отрицательного потенциала, подаваемого на его базу через сопротивление R_3 , открыт. По сопротивлению R_3 протекает эмиттерный ток $I_{э2}$ открытого триода T_2 . Ток $I_{э2}$ создает падение напряжения на зажимах R_3 $U_3 = I_{э2}R_3 = U_3'$. Принимая внутреннее сопротивление открытого триода T_2 равным нулю, можно считать, что (рис. 11-49, а) и $U_{вых} = U_3$. Это напряжение мало и недостаточно для создания выходного сигнала, соответствующего срабатыванию схемы. Триг-

гер находится в состоянии не действия. Напряжение U_3 через сопротивления R_6 , R_1 и R_2 прикладывается между эмиттером и базой триода T_1 , запирая последний. Это состояние триггера характеризуется на диаграмме работы триггера точкой 1.

Для срабатывания триггера необходимо подать на его входные зажимы 1 и 2 напряжение $U_{вх} = U_{с.р}$ (точка 2 на рис. 11-49, б). Это напряжение должно быть противоположно по знаку и равно по величине или больше напряжения U'_3 , запирающего триод T_1 . В результате этого триод T_1 начинает открываться, его сопротивление уменьшается, при этом отрицательный потенциал, подаваемый через сопротивление R_3 на коллектор T_1 и на базу T_2 , начинает уменьшаться. Вследствие этого триод T_2 начинает закрываться, ток эмиттера $I_{э2}$ уменьшается, что влечет за собой уменьшение напряжения U_3 , определяющего смещение на базе T_1 . Это способствует открытию триода T_1 и закрытию триода T_2 из-за снижения отрицательного потенциала на базе последнего. Процесс протекает лавинообразно и завершается полным открытием T_1 и закрытием T_2 .

В результате закрытия T_2 $U_{вых}$ скачком увеличивается до E_k (точка 3 на рис. 11-49, б). Триггер сработал. Дальнейшее увеличение $U_{вх} > U_{с.р}$ не изменит $U_{вых}$, так как оно достигло своего предельного значения E_k . Теперь $U_3 = I_{э1} R_3 = U'_3$.

При уменьшении $U_{вх}$, подводимого к базе T_1 , до $U_{вх} > U'_3$ потенциал базы T_1 становится положительным и триод T_1 начинает закрываться. В результате этого потенциал на базе T_2 начинает уменьшаться, вызывая открытие T_2 . Как и в предыдущем случае, процесс нарастает лавинообразно, завершаясь закрытием T_1 и открытием T_2 . Выходное напряжение $U_{вых}$ скачкообразно падает от E_k до U'_3 , и схема возвращается в начальное состояние.

Лавинообразный процесс закрытия и открытия триодов происходит практически мгновенно, т. е. скачком, как это требуется от устройства, работающего в релейном режиме.

Характеристика триггера на рис. 11-49, б является типовой характеристикой бесконтактного реле. При увеличении входного напряжения от нуля до $U_{с.р} = U'_3$ выходное напряжение скачком изменяется от $U_{вых1}$ до предельного значения $U_{вых3} = E_k$ и реле срабатывает. Напряжение, при котором происходит скачкообразное увеличение выходного напряжения, называется **напряжением срабатывания** бесконтактного реле. При уменьшении входного напряжения от $U_{с.р}$ до $U_{воз} = U'_3$ выходное напряжение скачком падает от $U_{вых3}$ до $U_{вых1}$ (точка 5); это означает, что бесконтактное реле вернулось в начальное положение. Соответствующее этому входное напряжение U'_3 называется **напряжением возврата** бесконтактного реле.

г) Логические схемы на типовых элементах

По условию производства, конструирования и эксплуатации целесообразна типизация логических схем и выполнение их на унифицированных типовых элементах. В этом направлении ведутся разработки, в частности для промышленной автоматики предложена серия логических элементов [Л. 54, 82] системы

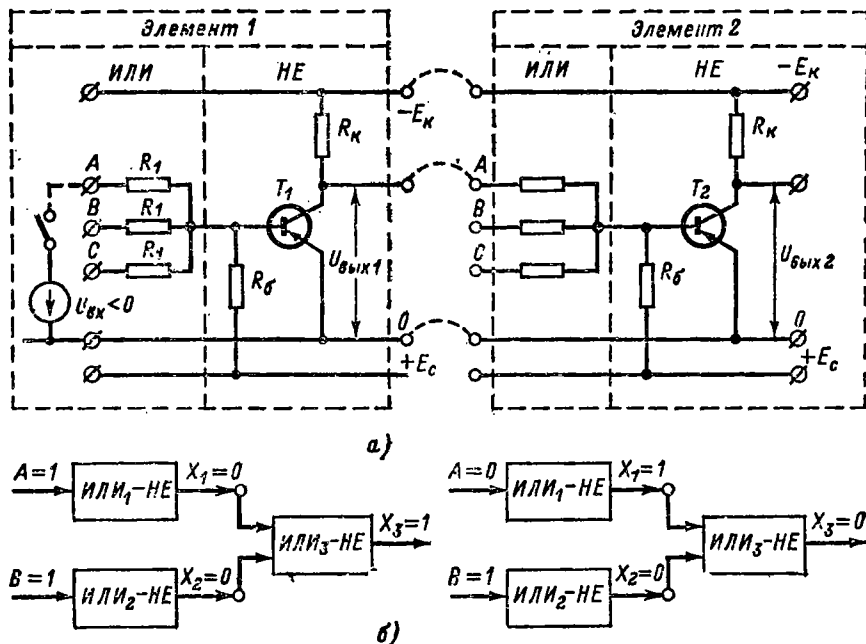


Рис. 11-50. Логические схемы на типовых элементах ИЛИ — НЕ.

а — схема ИЛИ с усилением сигнала; б — варианты логических схем на элементах ИЛИ — НЕ.

ЛОГИКА. Эти серии могут использоваться и в устройствах релейной защиты. В качестве основного типового элемента в системе ЛОГИКА принят элемент, построенный на сочетании двух логических схем ИЛИ и НЕ. С учетом, что схема НЕ осуществляет инверсию сигнала, такой типовой элемент называется также «ИЛИ с инверсией».

Схема ИЛИ выполнена на активных сопротивлениях R , а схема НЕ — на полупроводниковом триоде типа $p-n-p$. Все остальные элементы логических схем выполняются в виде различных сочетаний этого типового элемента.

Схема элемента ИЛИ — НЕ приведена на рис. 11-50, а. Здесь показано два элемента ИЛИ — НЕ 1 и 2. На вход А, В, С элемента 1 подается сигнал отрицательного знака по отношению к об-

шей точке схемы 0 ($U_{вх} < 0$). При отсутствии сигнала $U_{вх} = 0$, на базу триода T_1 подано положительное напряжение смещения $+E_{см}$, триод T_1 заперт и на его выходе имеется напряжение $U_{вых} = U_k = -E_k$.

При появлении отрицательного сигнала $U_{вх} > E_{см}$ триод T_1 открывается и $U_{вых} = 0$. Такой элемент **ИЛИ — НЕ** обладает важной особенностью. При подаче на его вход сигнала $U_{вх}$, условно принимаемого равным 1, выходной сигнал отсутствует, $U_{вых} = 0$, а при входном сигнале $U_{вх} = 0$ выходной сигнал отличен от нуля (или условно $U_{вых} = 1$). Эта особенность должна учитываться при образовании логических схем **ИЛИ**, **И**, **НЕ**, путем сочетания типовых элементов **«ИЛИ с инверсией»**.

Так, для осуществления логической операции **ИЛИ** необходимо соединить последовательно два элемента **ИЛИ — НЕ** (элементы 1 и 2 на рис. 11-50). Тогда при подаче на зажимы *A*, или *B*, или *C* элемента 1 отрицательного сигнала — $U_{вх}$ триод T_1 открывается, а триод T_2 закрывается, в результате чего на выходе элемента 2 появляется сигнал $U_{вых} = E_k$. При $U_{вх} = 0$ сигнал на выходе элемента 1 равен 1, а на выходе элемента 2 равен 0. Таким образом, рассмотренное сочетание двух элементов **ИЛИ — НЕ** действует как логическая схема **ИЛИ**, при этом наличие триодов позволяет усилить сигнал элемента **ИЛИ**, компенсируя ослабление входного сигнала в сопротивлениях *R* схемы.

Логическая операция **И** для двух сигналов *A* и *B* осуществляется путем соединения элементов **ИЛИ — НЕ** по схеме 11-50, 6. В этой схеме каждый элемент 1 и 2 преобразует входные сигналы, равные 1, в сигнал, равный 0, а элемент 3 преобразует 0 на выходе в сигнал, равный 1. Выходы триодов элементов 1 и 2 соединены параллельно, поэтому входной сигнал на элементе 3 равен 0 только при условии, что выходные сигналы элемента 1 и элемента 2 равны 1. В этом случае на выходе элемента 3 появится сигнал, равный 1. Если же хотя бы на одном из элементов 1 или 2 сигнал равен 0, то сигнал на входе элемента 3 равен 1, а на выходе элемента 3 — 0.

Элементы серии **ЛОГИКА** следует рассматривать как пример типовых элементов. Окончательных общепринятых типовых элементов пока еще не создано.

Элементы выдержки времени. В качестве элемента выдержки времени в схемах на полупроводниках применяются конденсаторные реле времени, в которых для создания выдержки времени t_p используется продолжительность заряда (или разряда) конденсатора *C*, включенного последовательно с активным сопротивлением *R*.

Принцип устройства реле времени, основанного на заряде конденсатора, показан на рис. 11-51. Реле состоит из зарядной цепи *RC*, делителя напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 и реагирующего органа (пульс-индикатора) *PO*, включенного между точками *a* и *b* через диод *D*. Нормально конденса-

тор зашунтирован пусковым устройством Π , напряжение $U_C = 0$, при этом потенциал точки a больше потенциала точки b ($U_a > U_b$), поэтому диод D заперт и ток в PO отсутствует.

При появлении сигнала на входе реле времени пусковое устройство Π срабатывает и дешунтирует конденсатор C , после чего он начинает заряжаться током I_3 , протекающим по контуру RC . При этом напряжение U_C растёт по экспоненциальному закону:

$$U_C = U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (11-47)$$

где τ — постоянная времени, равная RC .

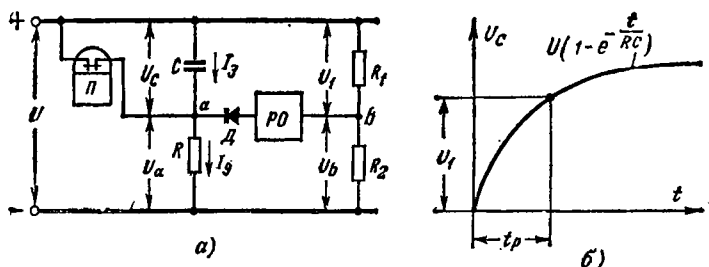


Рис. 11-51. Принципиальная схема конденсаторного времени.

a — схема реле; b — зависимость $U_C = f(t)$.

Графически зависимость $U_C = f(t)$ показана на рис. 11-51, b . По мере заряда конденсатора потенциал в точке a приближается к потенциалу точки b . Когда U_C достигнет напряжения на сопротивлении R_1 делителя напряжения (U_1 на рис. 11-51, b), потенциалы точек a и b уравниваются, затем $U_a = U - U_C$ станет меньше U_b , тогда диод D откроется и реагирующий орган сработает. Время, в течение которого конденсатор C заряжается до напряжения точки a делителя, является выдержкой времени реле (t_p), а $U_C = U_1 = U_{c.p.}$

Аналитически значение t_p можно получить из (11-47), приняв $U_C = U_{c.p.}$:

$$t_p = RC \ln \frac{U}{U - U_{c.p.}}. \quad (11-48)$$

Из (11-48) и рис. 11-51, b следует, что t_p зависит от C , R , $U_{c.p.}$ и U . Выдержка времени реле обычно регулируется изменением R , что меняет скорость нарастания U_C . При прекращении входного сигнала пусковое устройство Π вновь шунтирует конденсатор C , он разряжается и нуль-индикатор прекращает свою работу (реле времени возвращается). Разряд продолжается в течение сотых долей секунды, после чего реле вновь готово к действию.

Основная трудность выполнения конденсаторного реле времени состоит в обеспечении его точности. Погрешность реле времени,

применяемых в релейной защите, должна удовлетворять условию $\Delta t \leq 0,1 \div 0,2$ с.

Для получения требуемой точности необходимо:

1) обеспечить стабильность емкости C и тока $i_{утечки}$ конденсатора C , сопротивления R , питающего напряжения U и напряжения срабатывания $U_{с.р.}$;

2) иметь отношение $U_{с.р.}/U \leq 0,63$, при этом реле работает на крутой части характеристики $U_C = f(t)$ и колебания $U_{с.р.}$ весьма незначительно влияют на изменение t_p ;

3) исключить влияющие подпитки конденсатора C в процессе его заряда через побочные цепи, кроме цепи RC .

На рассмотренном принципе разработано большое количество вариантов схем исполнения реле времени. В виде примера реле времени, применяемого в схемах защиты, приведена конструкция реле, разработанного ВНИИЭ (рис. 11-52).

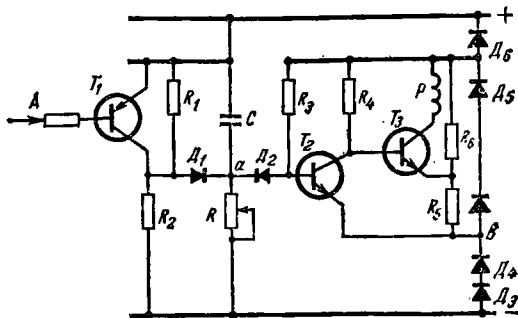


Рис. 11-52. Схема реле времени с нуль-индикатором на полупроводниках (триод T_1 типа $p-n-p$, триоды T_2 и T_3 — $n-p-n$).

Реле состоит из пускового устройства, выполненного с помощью транзистора (триода) T_1 типа $p-n-p$, зарядного контура RC , делителя напряжения D_3-D_6 и реагирующего нуль-индикатора, выполненного посредством триодов T_2 и T_3 типа $n-p-n$. Точки a и b соответствуют тем же точкам на схеме рис. 11-51.

Нормально триод T_1 и диод D_1 открыты и шунтируют емкость C . На базу триода T_2 подается положительное по отношению к эмиттеру смещение через резистор R_3 , и он открывается током базы, замыкающимся по этому сопротивлению. При этом на базу T_3 через открытый триод T_2 подается отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал, вследствие чего триод T_3 закрывается и ток в реле P отсутствует. Диод D_2 закрыт, так как на него подано напряжение обратного знака. При поступлении сигнала A на вход реле триод T_1 закрывается и конденсатор C начинает заряжаться. Диоды D_1 и D_2 закрыты, поэтому процесс заряда зависит только от параметров контура RC . Когда потенциалы точек a и b сравняются, диод D_2 откроется и подаст напряжение точки a к базе триода T_2 . Параметры цепей подобраны так, что потенциал точки a получается ниже потенциала точки b , поэтому триод T_2 закрывается.

В результате этого база триода T_3 получает положительный потенциал через сопротивление R_4 . Триод T_3 открывается, и в реле P появляется ток коллектора, под действием которого оно срабатывает. При снятии сигнала A триоды T_1 , T_2 , T_3 возвращаются в первоначальное состояние, а конденсатор C разряжается за $0,02$ с. Напряжение, питающее схему реле времени, стабилизируется с помощью опорных диодов D_3-D_6 .

Данное реле имеет выдержку времени до 9 с. Погрешность реле не более $\pm 0,15$ с при изменении температуры от 25 до $+50^\circ\text{C}$.

д) Примеры схем бесконтактных релейных защит на полупроводниках

В качестве примера бесконтактной защиты на полупроводниках, разработанной ВНИИЭлектропривод на типовых элементах ЛЮГИКА, в приложении приводится схема максимальной защиты, выпускаемая ЧЭАЗ для линий 6—10 кВ. Ниже приводится более сложная схема одноступенчатой трехсистемной дистанционной защиты, разработанная ВНИИЭ [Л. 56]. Эта защита предназначена для использования в качестве резервной от междуфазных к. з. на линиях 110—220 кВ.

Структурная схема защиты представлена на рис. 11-53. Защита состоит из дистанционного органа 1, выполненного с помощью трех направленных реле сопротивления с эллипти-

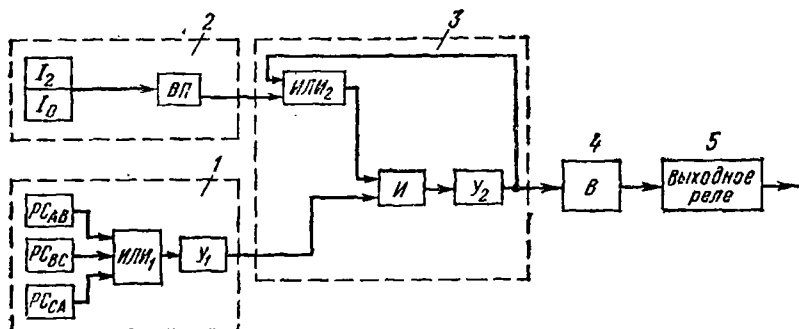


Рис. 11-53. Структурная схема одноступенчатой дистанционной защиты на полупроводниках.

ческой характеристикой; пускового органа 2, реагирующего на I_2 и I_0 ; логической схемы 3, осуществляемой с помощью элементов ИЛИ, И и усилителей $У$; конденсаторного реле времени 4 и исполнительного органа 5. Все элементы схемы выполнены на полупроводниках, кроме исполнительного органа, в качестве которого используется электромеханическое реле типа РП-7.

Реле сопротивления РС действуют на элемент ИЛИ, выполненный на трех диодах по схеме рис. 11-45. Для увеличения мощности выход схемы ИЛИ₁ заведен на усилитель $У_1$.

Пусковое реле в данной защите не является обязательным, поскольку дистанционный орган защиты отстроен от нагрузки. Пусковой орган предусмотрен для исключения неправильной работы защиты при нарушениях в питающих ее цепях напряжения и отстройки от нагрузки и качаний в симметричном режиме. Выходной сигнал пускового реле I_2 и I_0 воздействует на элемент временной памяти ВП, который как бы запоминает полученный сигнал и продолжает его передавать в течение 0,1 с после прекращения действия реле I_2 и I_0 . Такая работа ВП равносильна замедлению возврата пускового реле и необходима для надежного действия пос-

ледного при трехфазных к. з., когда токи несимметрии I_2 и I_0 возникают кратковременно, лишь в начале к. з., в течение 0,01—0,03 с.

Защита приходит в действие, если на элемент *И* поступает входной сигнал от пускового органа (через элемент *ИЛИ*₂) и от дистанционного органа одновременно. Возникающий при этом выходной сигнал на элементе *И* усиливается усилителем $У_2$ и подается на реле времени *В*. По истечении заданной выдержки времени t_3 реле времени срабатывает и посылает сигнал на исполнительный орган, который с помощью поляризованного реле РП-7 дает команду на отключение выключателя линии.

Для обеспечения действия защиты при симметричных трехфазных к. з., когда импульс, подаваемый пусковым органом (реагирующим на первоначальную несимметрию), прекращается значительно раньше, чем срабатывает реле времени защиты, предусмотрена обратная связь с выхода усилителя $У_2$. Одновременно с подачей сигнала на реле времени по цепи обратной связи подается сигнал на элемент *ИЛИ*₂. Благодаря этому при трехфазных к. з. после прекращения сигнала от пускового органа элемент *ИЛИ*₂ будет продолжать посылку сигнала на элемент *И* за счет обратной связи. Таким образом, создается своеобразная цепь самоудерживания от дистанционных органов схемы, обеспечивающая действие защиты при кратковременном срабатывании пускового органа.

Полные схемы элементов защит показаны на рис. 11-54 и 11-55.

Пусковой орган (рис. 11-54) реагирует на I_2 и I_0 , которые получают от фильтра обратной последовательности Φ_2 и трансформатора T_0 и выпрямляются мостами B_1 и B_2 . На стороне выпрямленного тока мосты соединены параллельно. Для сглаживания выпрямленного напряжения предусмотрен конденсатор C_3 . Напряжение между точками 1 и 2 (рис. 11-54) определяется величиной большого тока (I_2 или I_0).

Реагирующим элементом пускового органа, обладающим временной памятью, являются триоды T_3 и T_4 .

Параметры сопротивлений ($R_{12} - R_{10}$ и $R_{14} - R_{11}$) подобраны таким образом, что потенциал эмиттера триода T_3 при отсутствии I_2 и I_0 получается выше потенциала базы, вследствие чего триод T_3 закрыт. При этом на базу T_4 подается положительный потенциал (через R_{15}). Триод T_4 открыт и напряжение на выходных зажимах органа *И*-7 равно нулю, так как они зашунтированы открытым триодом T_4 .

При появлении I_2 или I_0 выпрямленный ток I замыкается по сопротивлению R_{10} и на его зажимах появляется напряжение $U = IR_{10}$, пропорциональное этим токам. При определенном значении I_2 или I_0 потенциал точки 2 повышается настолько, что диод D_6 закрывается, вызывая увеличение потенциала в точке 3. В результате этого триод T_3 открывается, а триод T_4 вследствие понижения потенциала в точке 4 закрывается, размыкая цепь между *И* и 7. На выходе пускового органа (точки *И* и 7) появляется напряжение, означающее, что он сработал.

При исчезновении I_2 и I_0 триод T_3 снова закрывается. Но благодаря памяти, осуществленной с помощью заряженного конденсатора C_5 , T_4 открывается не сразу, а только через 0,01 с, пока не разрядится C_5 . Эта емкость была заряжена при предшествующем открытии триода T_3 током, протекавшим по цепи $C_5 - R_{11}$. Потенциал точки 4, от которого зависит состояние триода T_4 , по мере разряда емкости C_5 повышается.

По окончании разряда, продолжающегося 0,01 с, потенциалы точек 4 и 7 (базы и эмиттера) становятся равными, триод T_4 открывается и выходное на-

пряжение (сигнал) на зажимах II-7 исчезает. Таким образом, с помощью конденсатора C_3 осуществляется временное запоминание появления I_2 или I_0 . Регулирование уставки срабатывания реле производится изменением напряжения, снимаемого с фильтров обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей.

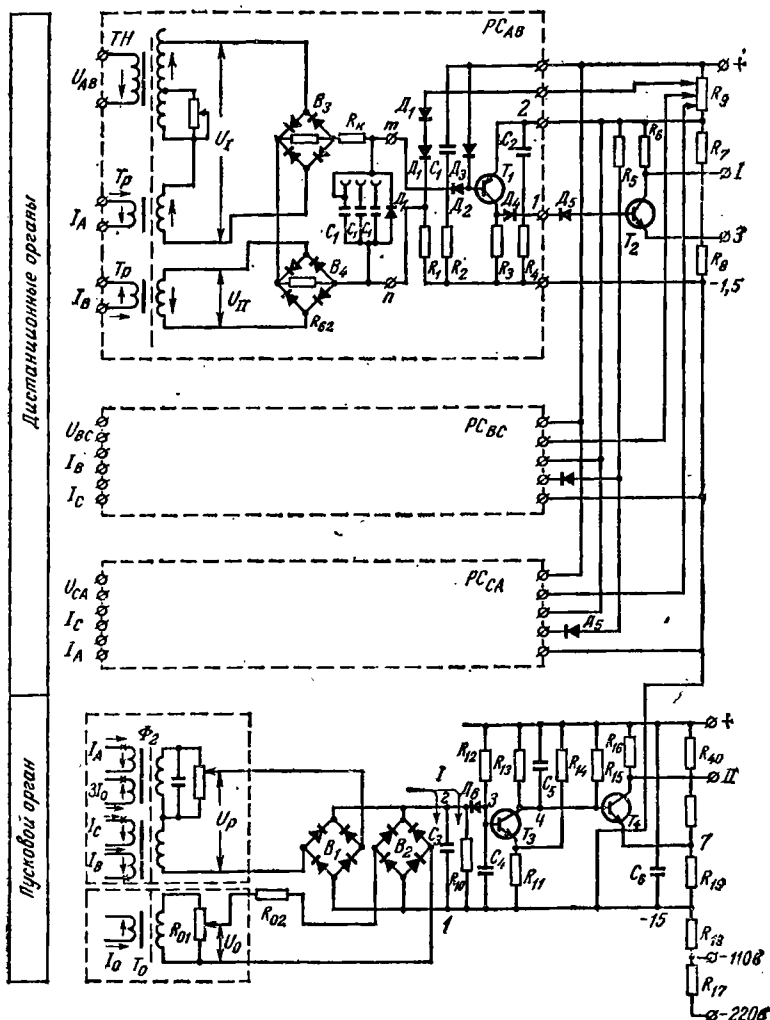


Рис. 11-54. Схема пускового и дистанционного органов защиты (напряжения $\dot{U}_I = \dot{U}_{AB} - k\dot{I}_{AB}$; $\dot{U}_{II} = k\dot{U}_{AB}$; $\dot{U}_p = k\dot{I}_2$; $\dot{U}_0 = k\dot{I}_0$).

Дистанционный орган. В качестве реле сопротивлений PC (рис. 11-54) применяются реле, рассмотренные в § 11-6. Они включаются на междуфазное напряжение и разность фазных токов по табл. 11-1.

Реле PC состоит из промежуточного трансформатора напряжения TH и трансреакторов TP , с помощью которых получают напряжения $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

Эти напряжения выпрямляются выпрямителями B_3 и B_4 , а затем сравниваются посредством схемы сравнения, построенной на балансе напряжения. На выходных зажимах m и n получается напряжение $\dot{U}_{mn} = |\dot{U}_I| - |\dot{U}_{II}|$, подводимое к нуль-индикатору.

Нуль-индикатор является двухкаскадным усилителем на триодах T_1 (типа $p-n-p$) и T_2 (типа $n-p-n$).

Триод T_2 является общим для всех трех реле РС. Для этого выходной зажим 1 триода T_1 каждого реле связан с базой T_2 через диод D_5 по схеме ИЛИ.

При отсутствии напряжения на зажимах m и n или при его отрицательном знаке триод T_1 открыт, на диоды D_5 подается обратное напряжение и они закрываются. База триода T_2 имеет по отношению к эмиттеру положительный потенциал (через R_6), поэтому триод T_2 открыт и напряжение на выходных зажимах 1—3 равно нулю.

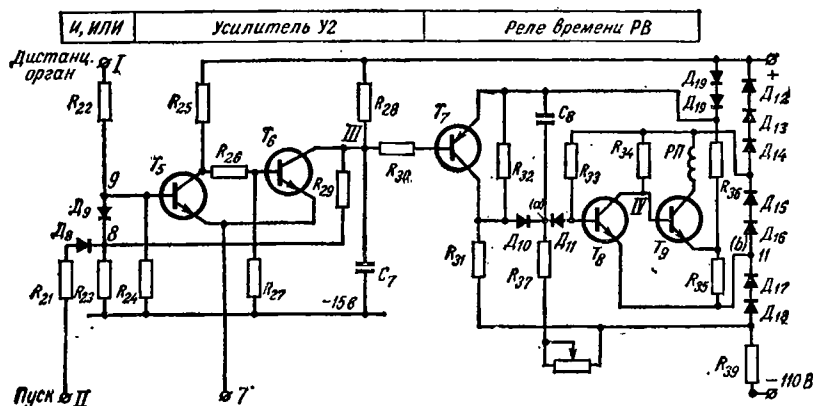


Рис. 11-55. Логическая часть схемы одноступенчатой дистанционной защиты.

При появлении положительного напряжения на выходе схемы сравнения (зажимы m и n) триод T_1 закрывается. Конденсатор C_2 начинает заряжаться, и когда потенциал точки 7 станет равным потенциалу в точке 3, диод D_5 откроется, в результате чего потенциал базы T_2 станет ниже потенциала эмиттера и триод T_2 откроется. На выходных зажимах 1—3 появляется напряжение, воздействующее на логическую часть защиты.

Конденсаторы C_1 служат для регулирования величины малой оси эллиптической характеристики срабатывания реле. Конденсатор C_2 создает замедление срабатывания реле на 0,1 с.

Логическая схема защиты изображена на рис. 11-55. Она состоит из логических элементов ИЛИ₂ (рис. 11-53) и И (R_{21} , R_{22} , R_{23} , R_{29} , D_8 , D_9), усилителя $У_2$ (рис. 11-53), реле времени РВ и выходного реле РП.

К зажиму I схемы подается сигнал от дистанционного органа, а к зажиму II — от пускового. Сопротивления R_{21} и R_{29} образуют элемент ИЛИ₂, выходом которого является точка 8. При появлении сигнала II от пускового органа ИЛИ от обратной связи через сопротивление R_{29} в точке 8 появляется напряжение.

Точка 9 является выходом элемента И₁ и одновременно входом усилителя $У_2$, состоящего из двух триодов T_5 и T_6 . Элемент И образуется с помощью диода D_9 и сопротивления R_{22} , по которому поступает сигнал I от дистанционного органа, и точки 8, с которой приходит сигнал II от пускового реле.

Если пусковой и дистанционные органы защиты не действуют, то сигналы I и II отсутствуют. При этом потенциал базы триода T_5 (точка 9) ниже,

чем у его эмиттера (точка 7), вследствие чего T_5 закрыт. Закрыт также и диод D_9 , поскольку на него подано обратное напряжение. Усилитель U_2 и реле времени не работают. В случае появления сигнала II потенциал точки 9 (от которого зависит работа T_5) не меняется, так как диод D_9 закрыт и не пропускает сигнал II . При появлении сигнала I потенциал зажима I повышается, но при этом открывается диод D_9 , в результате чего потенциал точки 9 остается ниже точки 7 и триод T_5 не работает.

При действии пускового и дистанционного органов сигналы I и II появляются одновременно. Сигнал II держит диод D_9 запертым, и благодаря этому под влиянием сигнала I потенциал точки 9 повышается.

Таким образом, на выходе элемента II появляется сигнал, в результате которого триод T_5 открывается, а T_6 закрывается. Это вызывает повышение потенциала, т. е. появление сигнала на выходном зажиме III усилителя U_2 .

При появлении сигнала III триод T_7 закрывается и депультирует конденсатор C_8 , чем осуществляется пуск реле времени. Последнее работает так же, как и схема на рис. 11-52.

Нуль-индикатор реле времени состоит из триодов T_8 и T_9 . При срабатывании реле времени (т. е. открытии триода T_9) под действием коллекторного тока триода T_9 приходит в действие выходное реле PII , которое подает импульс на отключение.

Сигнал III по цепи обратной связи R_{29} поддерживает повышенный потенциал в точке 8, не позволяющий работать диоду D_9 . Таким образом поддерживается работа U_2 и реле времени при трехфазных к. з., сопровождающихся кратковременным появлением сигнала II .

Рассмотренная защита имеет в 4 раза меньшие габариты по сравнению с аналогичной одноступенчатой дистанционной защитой с реле типа КРС-131. Потребление цепей напряжения защиты равно 3 В · А, а токовых цепей составляет 1 В · А при токе 5 А. Для устранения мертвой зоны предусматривается смещение характеристики реле сопротивления в III квадранте примерно на 10%. Угол $\varphi_{м.ч}$ имеет две уставки: 60 и 80°.

11-15. ВЫБОР УСТАВОК ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Ниже рассматривается выбор характеристик трехступенчатой защиты на примере участка сети, показанного на рис. 11-56 [Л. 81]. Выбираются уставки защиты A , уставки защит B и C принимаются заданными. Для большей наглядности характеристики согласуемых между собой дистанционных защит $t_3 = f(z)$ обычно изображаются графически на диаграмме в осях t, z (рис. 11-56, б). По оси z откладываются первичные сопротивления прямой последовательности z_1 рассматриваемых участков сети.

При выборе сопротивлений срабатывания дистанционных органов необходимо учитывать погрешности, вызывающие отклонение $z_{с.р}$ от принятой уставки z_y , считаем, что $z_{с.р} = z_y \pm \Delta z$. На величину Δz влияют погрешности реле, измерительных трансформаторов и неточность настройки реле на заданную уставку z_y .

Помимо того возможна погрешность в определении сопротивлений участков сети, что учитывается дополнительным запасом.

Первая зона защиты. Время срабатывания первой зоны не регулируется, оно определяется собственным временем действия реле и в зависимости от конструкции реле составляет: $t_1 = 0,02 \div 0,15$ с.

Сопротивление срабатывания первой зоны z_{1A} выбирается из условия, чтобы дистанционный орган

этой зоны не мог сработать за пределами защищаемой линии ЛІ (рис. 11-56).

Выполнение этого условия необходимо для обеспечения селективности, поскольку первая зона не имеет выдержки времени.

Поэтому z_{IA} выбирается меньше сопротивления защищаемой линии z_{IL} так, чтобы при максимальной положительной погрешности $+ \Delta z$ выполнялось условие $(z_{IA} + \Delta z) < z_{IL}$ (рис. 11-57).

В соответствии с этим z_{IA} рассчитывается по выражению

$$z_{IA} = k_1 z_{IL}, \quad (11-49)$$

где z_{IL} — сопротивление прямой последовательности защищаемой линии ЛІ; k_1 — коэффициент, учитывающий с некоторым запасом погрешности Δz , могущие вызвать увеличение $z_{c.p.}$ Величина k_1 зависит от точности реле, для реле КРС $k_1 = 0,85$.

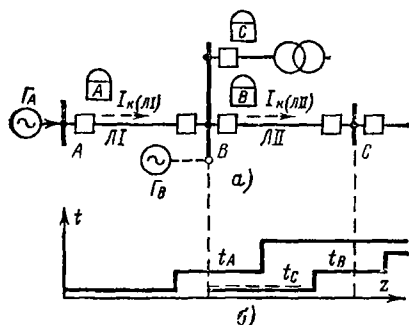


Рис. 11-56. Участок сети, защищаемый защитой А (а), и изображение характеристик выдержек времени дистанционных защит в осях z , t (б).

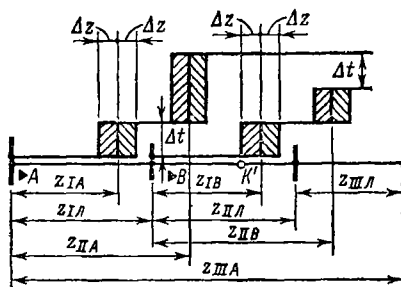


Рис. 11-57. Согласование характеристик дистанционных защит А и В двух смежных линий (рис. 11-56).

Погрешность трансформаторов тока приводит к сокращению зоны действия защиты. Поэтому трансформаторы тока, питающие дистанционную защиту, следует выбирать по кривым предельной кратности (при 10%-ной погрешности) при максимальном токе к. з. в конце первой зоны.

Вторая зона. Вторая зона защиты должна надежно охватывать защищаемую линию ЛІ, поэтому она выходит за ее пределы.

Для обеспечения селективности сопротивление срабатывания z_{IIA} и выдержку времени второй зоны t_{IIA} отстраивают от быстродействующих защит трансформаторов и линий, отходящих от шин противоположной подстанции (рис. 11-57). Выдержка времени выбирается равной:

$$t_{IIA} = t_{IB} + \Delta t, \quad (11-50)$$

где t_{IB} — максимальное время действия быстродействующих защит следующего участка ($t_{IB} \approx 0,1$ с).

С учетом возможного сокращения первой зоны защиты B на Δz (рис. 11-57) вторая зона защиты A должна быть отстроена от точки K' аналогично тому, как отстраивалась первая зона этой же защиты от конца линии (т. е. от точки B). Сопротивление от защиты A до K' равно $z_{II} + k_{Iz_{IB}}$, откуда

$$z_{IIA} = k_{II} (z_{II} + k_{Iz_{IB}}), \quad (11-51)$$

где k_I — коэффициент, учитывающий сокращение z_{IB} на Δz , принимается равным 0,85—0,9; k_{II} — коэффициент, учитывающий возможное увеличение z_{IIA} в результате погрешностей дистанционного органа второй зоны защиты A , принимается равным 0,85.

При нескольких источниках питания (Γ_A и Γ_B на 11-56, а) z_{IIA} выбирается с учетом токораспределения по выражению

$$z_{IIA} = k_{II} (z_{II} + k_T k_{Iz_{IB}}), \quad (11-52)$$

где k_T — коэффициент токораспределения, равный отношению тока к. з. $I_{K(ЛII)}$, проходящему по линии $ЛII$, к току к. з. $I_{K(ЛИ)}$, текущему по линии $ЛИ$:

$$k_T = \frac{I_{K(ЛII)}}{I_{K(ЛИ)}}. \quad (11-53)$$

Коэффициент k_T должен выбираться при таком реальном режиме, когда $I_{K(ЛИ)}$ имеет максимальное значение, а $I_{K(ЛII)}$ — минимальное.

Для отстройки от к. з. за трансформаторами и T подстанции B с учетом токораспределения вторая зона должна удовлетворять условию

$$z_{IIA} = k_{II} [z_{I(ЛI)} + k_T z_{IT}], \quad (11-54)$$

где z_{IT} — сопротивление наиболее мощного трансформатора на подстанции B , учитывается наименьшее z_{IT} , имеющее место при регулировании напряжения изменением коэффициента трансформации (Δn) рассматриваемого трансформатора (по данным завода); коэффициент токораспределения

$$k_T = \frac{I_{K(T)}}{I_{K(ЛI)}};$$

k_{II} — то же, что и в выражении (11-51).

За окончательную величину z_{IIA} принимается меньшее из двух значений по выражениям (11-52) и (11-54).

В ы б р а н н о е z_{IIA} проверяется по условию надежного действия (ч у в с т в и т е л ь н о с т и) при к. з. на шинах подстанции В. Согласно ПУЭ

$$k_q = \frac{z_{IIA}}{z_{I(LI)}} \geq 1,25.$$

Для линий с сопротивлением 5—20 Ом следует стремиться, чтобы $k_q = 1,5 \div 2$, так как при малом k_q защиты на линиях с небольшим сопротивлением могут отказывать при к. з. через сопротивление дуги.

Если вторая зона ненадежно охватывает защищаемую линию, т. е. $k_q < 1,25$, то ее можно отстраивать не от первой, а от конца второй зоны защиты В. При этом время действия второй зоны защиты А должно отстраиваться от времени второй зоны защиты В: $t_{IIB} = t_{IIV} + \Delta t$, а величина z_{IIA} должна выбираться по выражению (11-52), в котором вместо z_{IV} нужно подставить z_{IIB} .

Третья зона. Третья зона должна резервировать защиты при соединений, отходящих от шин подстанции В. Уставки срабатывания этой зоны выбираются, как правило, по условию отстройки от н а г р у з к и, а выдержка времени — по условию с л е к т и в н о с т и. Третья зона осуществляется пусковыми реле дистанционной защиты, в качестве которых используются токовые реле или реле сопротивления.

Ток срабатывания токовых пусковых реле выбирается так же, как и у максимальной защиты, по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_3 I_{\text{раб. макс}}}{k_{\text{воз}}}, \quad (11-54a)$$

где $k_n = 1,2$ — коэффициент надежности; k_3 — коэффициент, учитывающий увеличение тока за счет самозапуска заторможенных электродвигателей; $I_{\text{раб. макс}}$ — максимальный ток нагрузки с учетом ее увеличения, обусловленного отключением соответствующего участка прилегающей сети (например, параллельной линии или второй линии, питающей подстанцию, и т. д.); $k_{\text{воз}}$ — коэффициент возврата.

Если необходимо обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в защите ПЗ-152 и ДЗ-1), то $I_{с.з}$ должно удовлетворять также второму условию

$$I_{с.з} = k_n I_{\text{неп. ф}}^{(2)}, \quad (11-55)$$

где $k_n = 1,2$; $I_{\text{неп. ф}}^{(2)}$ — максимальное значение тока в неповрежденной фазе при двухфазном к. з. на защищаемой линии.

Чувствительность пускового органа проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования по минимальному значению $I_{к.з}$. Согласно ПУЭ $k_q = I_{к. мин} / I_{с.з}$ в первом случае должен быть не меньше 1,5, а во втором — 1,2.

Сопротивление срабатывания третьей зоны $z_{с.з} = z_{IIA}$ ненаправленного реле сопротивления выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления $z_{\text{раб. мин}}$, появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего к. з.

Наименьшее значение $z_{\text{раб. мин}}$ имеет место при максимальном токе нагрузке в фазе $I_{\text{раб. макс}}$ и пониженном уровне рабочего напряжения $U_{\text{раб. мин}}$, обычно принимаемого на 5—10% меньше номинального:

$$z_{\text{раб. мин}} = \frac{U_{\text{раб. мин}}}{k_{\text{в}} I_{\text{раб. макс}} \sqrt{3}}. \quad (11-56)$$

Здесь под $U_{\text{раб. мин}}$ подразумевается линейное напряжение.

Для обеспечения надежного возврата пускового органа в худших условиях $z_{\text{с. з}}$ находится из уравнения

$$z_{\text{с. з}} = \frac{z_{\text{раб. мин}}}{k_{\text{н}} k_{\text{воз}}}, \quad (11-57)$$

где $k_{\text{н}}$ — коэффициент, учитывающий погрешности реле, принимается равным $1,1 \div 1,2$; $k_{\text{воз}}$ — коэффициент возврата реле; $k_{\text{з}}$ — коэффициент, учитывающий самозапуск двигателей.

Полученное $z_{\text{с. з}}$ является максимальным допустимым значением по условию возврата реле и расчетным значением z_{IIA} .

При необходимости обеспечить избирательность поврежденных фаз (например, в односистемной защите) $z_{\text{с. з}}$ отстраивается также от минимального значения сопротивления в неповрежденной фазе $z_{\text{неп. ф}}^{(2)}$ при двухфазном к. з.

В этом случае, кроме условия (11-57), необходимо выполнить второе условие:

$$z_{\text{с. з}} = k_{\text{н}} z_{\text{неп. ф. мин}}^{(2)}, \quad (11-58)$$

где $k_{\text{н}} = 0,85 \div 0,9$.

Чувствительность пускового реле проверяется при к. з. в конце защищаемой линии и в конце зоны резервирования и оценивается коэффициентом

$$k_{\text{ч}} = \frac{z_{\text{IIA}}}{z_{\text{к. макс}}},$$

где $z_{\text{к. макс}}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в расчетной точке.

Согласно ПУЭ при к. з. в конце второго участка допускается $k_{\text{ч}} \geq 1,2$.

Сопротивление срабатывания пускового направленного реле сопротивления выбирается, как и у ненаправленных реле, из условия отстройки от нагрузки по формуле (11-57). Поскольку $z_{\text{с. з}}$ направленного реле сопротивления зависит от угла $\varphi_{\text{р}}$, найденное сопротивление срабатывания $z_{\text{с. з(н)}}$ должно иметь место при $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{н}}$, соответствующем нагрузочному режиму работы линии.

При к. з. $\varphi_{\text{р}} = \varphi_{\text{л}} = \varphi_{\text{м. ч}}$, и поэтому реле работает с максимальной чувствительностью, т. е. с $z_{\text{с. з. макс}}$ (рис. 11-58).

Значение $z_{\text{с. з. макс}}$, допустимое по условиям нагрузки $z_{\text{с. з(н)}}$, можно найти из уравнения срабатывания направленного реле сопротивления:

$$z_{\text{с. з}} = z_{\text{с. з. макс}} \cos(\varphi_{\text{м. ч}} - \varphi_{\text{р}}).$$

Подставив в него найденные из (11-57) величины $z_{с.з(н)}$ и φ_H вместо $z_{с.з}$ и φ_P , получим:

$$z_{с.в. макс} = \frac{z_{с.з(н)}}{\cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_H)} = \frac{z_{раб. мин}}{k_H k_{воз} \cos(\varphi_{м.ч} - \varphi_H)}. \quad (11-59)$$

Найденное значение $z_{с.з. макс}$ является диаметром окружности характеристики срабатывания реле и уставкой z_{II} , удовлетворяющей условию отстройки от максимальной нагрузки защищаемой линии.

Чувствительность пускового реле определяется по выражению

$$k_{ч} = \frac{z_{с.з. макс}}{z_{к. макс}},$$

где $z_{к. макс}$ — наибольшее сопротивление на зажимах реле при к. з. в конце второго участка, резервируемого данной защитой.

В некоторых случаях для уменьшения t_{II} сопротивление срабатывания z_{IIA} можно согласовывать с концом зоны z_{IIA} следующего участка, если при этом обеспечивается достаточное резервирование присоединений, отходящих от шин подстанции В. Тогда $t_{IIA} = t_{IIA} + \Delta t$, при этом под t_{IIA} подразумевается наибольшая выдержка времени резервируемых защит.

Условие отстройки от $z_{раб. мин}$ при выборе z_{II} сохраняется и в этом случае.

Вторичные величины сопротивлений срабатывания. Для пересчета полученных первичных сопротивлений на вторичную сторону необходимо вычислить вторичные значения напряжения и тока, соответствующие первичным значениям $U_{р.п}$ и $I_{р.п}$:

$$U_{р.в} = \frac{U_{р.п}}{n_{II}} \text{ и } I_{р.в} = \frac{I_{р.п}}{n_T}.$$

Исходя из этого, находят вторичное сопротивление срабатывания на зажимах реле:

$$z_{с.р} = \frac{U_{р.в}}{I_{р.в}} = z_{с.з} \frac{n_T}{n_{II}}. \quad (11-60)$$

Подставляя в (11-60) вместо $z_{с.з}$ значения z_I , z_{II} и z_{III} , находят значения вторичных сопротивлений срабатывания.

Все реле сопротивления должны работать в диапазоне токов к. з., лежащем между токами точной работы реле, с тем чтобы погрешность реле не превышала 10%. Для проверки выполнения этого условия по техническим данным на реле определяются значения тока точной работы при выбранных уставках. Эти значения токов сопоставляются с максимальными и минимальными величинами $I_{к.з}$, имеющими место в конце данной зоны.

Особенность выбора уставок срабатывания первой и второй зон на линиях с ответвлениями. На линиях с ответвлениями, питающими понижительные под-

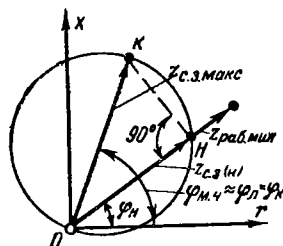


Рис. 11-58. Выбор $z_{с.з}$ направленного реле сопротивления.

станции (рис. 11-59), первая и вторая зоны выбираются по рассмотренным выше условиям и дополнительно отстраиваются от к. з. за трансформатором ответвления.

Такое ограничение их действия позволяет обеспечить селективность дистанционной защиты с максимальными защитами трансформатора ответвления и питающей от него сети без увеличения выдержки времени t_I и t_{II} первой и второй зон защиты.

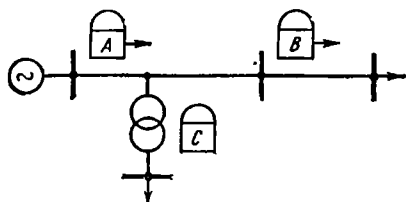


Рис. 11-59. Схема, поясняющая выбор уставок дистанционной защиты на линиях с ответвлениями.

к. з. со стороны подстанции В запас отстройки от к. з. за трансформатором повышается.

Выдержка времени t_{II} выбирается по условию (11-50). При этом допускается неселективное действие первой зоны защиты А, имеющей $t_I = 0$, при к. з. в трансформаторе ответвления. Эта неселективность устраняется с помощью АПВ на линии. Вторая зона при повреждении в трансформаторе действует селективно, поскольку t_{II} отстраивается от быстродействующих линий и трансформаторов.

Чувствительность третьей зоны защиты должна проверяться по к. з. за трансформатором ответвления, а выдержка времени t_{II} должна быть отстроена от времени действия максимальной защиты этого трансформатора.

11-16. КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Выполнение защит на дистанционном принципе имеет целый ряд существенных преимуществ, способствовавших широкому применению этих защит в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения.

Главными достоинствами дистанционного принципа являются:

1. Селективность действия в сетях любой конфигурации с любым числом источников питания.
2. Малые выдержки времени в начале защищаемого участка, которые обеспечиваются первой зоной, охватывающей до 85—90% защищаемой линии, что необходимо по условиям устойчивости, требующим быстрого отключения повреждений вблизи шин электростанции и мощных узловых подстанций.
3. Значительно большая чувствительность при к. з. и лучшая отстройка от нагрузки и качаний по сравнению с токовыми максимальными защитами.

К числу недостатков дистанционных защит следует отнести:

1. Сложность защиты как в части схемы, так и в части входящих в ее состав реле. Дистанционные защиты с электромеханическими реле являются самыми многорелейными и многоконтактными защитами.

Бесконтактные защиты на полупроводниковых приборах отличаются сложностью логической части схемы и большим количеством элементов в ней.

2. Невозможность обеспечения мгновенного отключения к. з. в пределах всей защищаемой линии. Поэтому они не могут служить основными защитами на тех участках сети, где необходимо выполнение этого требования.

3. Реагируют на качания и нагрузку. Необходимость отстройки от последней существенно ограничивает чувствительность защиты и понижает ее эффективность в качестве резервной защиты смежных участков, а возможность действия при качаниях вынуждает усложнять защиту применением блокировки.

4. Возможность ложной работы при неисправностях в цепях напряжения, что уменьшает их надежность и вызывает необходимость применения соответствующей блокировки.

За последние годы много сделано для усовершенствования дистанционных защит, большие успехи в этой области достигнуты отечественной техникой.

В качестве реальных путей дальнейшего усовершенствования дистанционных защит можно указать на следующие возможности:

1. Сочетание дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой (см. гл. 12) или передачей отключающих импульсов на противоположный конец линии, что позволяет обеспечить быстрдействие защиты в пределах всей защищаемой линии.

2. Внедрение дистанционных защит на полупроводниковых элементах, способствующее повышению надежности защиты за счет устранения многоконтактности их схем и улучшения параметров реагирующих органов.

3. Применение упрощенных схем дистанционной защиты при использовании ее для резервирования основных защит защищаемой ВЛ и защит смежных участков.

Несмотря на отмеченные недостатки, дистанционная защита является пока наиболее совершенной резервной защитой от междуфазных к. з. для линий всех напряжений до 750 кВ включительно и достаточно быстродействующей защитой для высоковольтных сетей 110 и 220 кВ, где она с успехом используется в качестве основной защиты на линиях средней и большой длины.

ГЛАВА ДВЕНАДЦАТАЯ

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЗАЩИТЫ

12-1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ

Высокочастотные (в. ч.) защиты являются быстродействующими и предназначаются для линий средней и большой длины. Они применяются в тех случаях, когда по условиям устойчивости или дру-

циальные защиты непригодны для длинных линий вследствие высокой стоимости соединительного кабеля и недопустимого увеличения его сопротивления.

Высокочастотные защиты состоят из двух комплектов, расположенных по концам защищаемой линии. Особенность этих защит заключается в том, что для их селективного действия при внешних к. з. необходима связь между комплектами защиты, осуществляемая посредством токов высокой частоты, которые передаются по проводам защищаемой линии.

По принципу своего действия в. ч. защиты не реагируют на к. з. вне защищаемой линии и поэтому, так же как и дифференциальные защиты, не имеют выдержки времени. В настоящее время применяются два вида в. ч. защит:

а) направленные защиты с высокочастотной блокировкой (т. е. с блокировкой токами высокой частоты), основанные на сравнении направлений мощности к. з. по концам защищаемой линии;

б) дифференциально-фазные в. ч. защиты, основанные на сравнении фаз токов по концам линии.

12-2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

Направленная в. ч. защита реагирует на направление (или знак) мощности к. з. по концам защищаемой линии. Как видно из рис. 12-1, а, при к. з. на защищаемой линии (в точке K_1) мощности

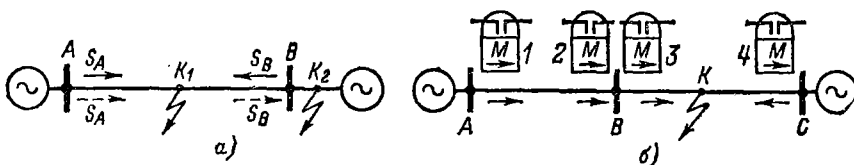


Рис. 12-1. Направление мощности по концам линии при к. з.

а — на линии (K_1) и за ее пределами (K_2); б — сравнение направления мощности по концам линии с помощью реле направления мощности М.

к. з. на обоих концах поврежденного участка АВ имеют одинаковый знак и направление от шин в линию.

В случае же внешнего к. з. (точка K_2) направление и знак мощности по концам защищаемой линии оказываются различными. На ближайшем к месту повреждения конце линии мощность к. з. S_B отрицательна и направлена к шинам, а на удаленном положительна и направлена от шин в линию.

Из этого следует, что, *сравнивая направления мощности по концам линии, можно определить, где возникло повреждение: на линии или за ее пределами.*

Такое сравнение осуществляется при помощи реле мощности M (рис. 12-1, б), которые устанавливаются на обоих концах линии и включаются так, чтобы при к. з. на защищаемой линии они разрешали действие защит на отключение.

Поэтому при к. з. в точке K (рис. 12-1, б) действуют на отключение только защиты 3 и 4, установленные на поврежденной линии BC . На неповрежденной линии AB реле мощности защиты 1 замыкает свои контакты, разрешая ей действовать на отключение. Однако на приемном конце линии AB реле мощности защиты 2 под влиянием мощности к. з., направленной к шинам, размыкает свои

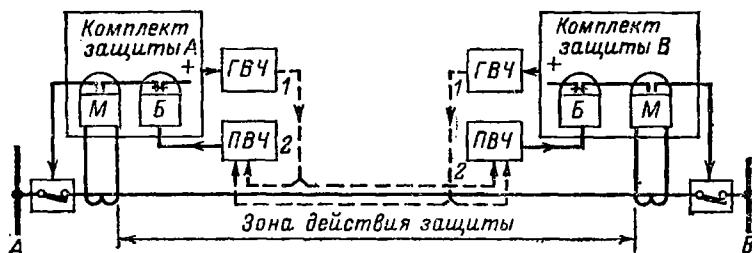


Рис. 12-2. Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой.

M — реле мощности; B — блокирующее реле; $ГВЧ$ — генератор токов высокой частоты; $ПВЧ$ — приемник токов высокой частоты.

контакты, чем запрещает действие на отключение своей защиты и одновременно блокирует действие защиты 1 посылкой блокирующего сигнала тока высокой частоты по проводам этой же линии. Блскирующий ток посылается специальными генераторами токов высокой частоты $ГВЧ$ (рис. 12-2), управляемыми реле мощности M , и принимается специальными приемниками токов высокой частоты $ПВЧ$, настроенными на ту же частоту, что и генераторы. Приняв высокочастотный сигнал, приемники выпрямляют полученный ток и подают его в обмотку блокирующего реле B , которое размыкает цепь отключения своей защиты, не позволяя ей действовать на отключение.

При к. з. на защищаемой линии блокирующий сигнал высокой частоты отсутствует, так как реле мощности, срабатывая, не позволяют действовать передатчикам высокой частоты. В этом случае контакты блокирующих реле остаются замкнутыми, разрешая реле мощности действовать на отключение.

Таким образом, блокирующий ток высокой частоты появляется в линии только при внешних к. з., обеспечивая селективную работу защиты. Зона действия защиты ограничивается трансформаторами тока, питающими реле мощности.

На рассмотренном принципе выполняются защиты, сравнивающие направления мощностей в фазах или мощности нулевой или обратной последовательности. Реле мощности в двух последних случаях включаются через соответствующие фильтры на токи и напряжения нулевой или обратной последовательности.

Из принципа действия направленной высокочастотной защиты следует, что защита состоит из двух комплектов (А и В на рис. 12-2), каждый из комплектов содержит релейную часть, реагирующую на направление мощности к. з., и в. ч. часть, генерирующую и принимающую токи высокой частоты.

12-3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЧАСТЬ ЗАЩИТЫ

а) Канал токов высокой частоты

Высокочастотным (в. ч.) каналом называют путь, по которому замыкаются токи высокой частоты, используемые для блокировки защиты.

На рис. 12-3 показан в. ч. канал по схеме фаза — земля, при которой ток высокой частоты передается по одному из проводов

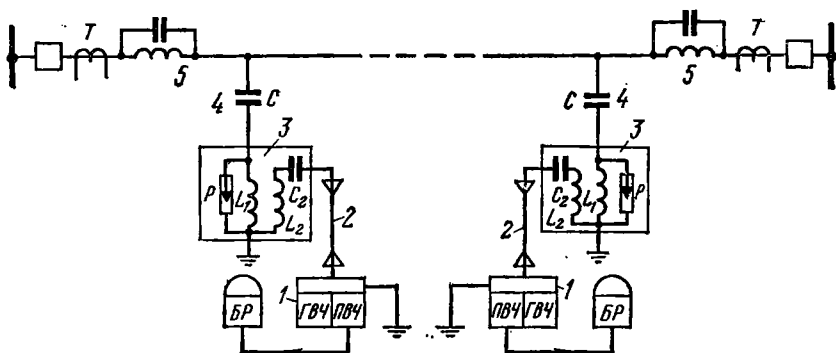


Рис. 12-3. Принципиальная схема высокочастотного канала.

линии и возвращается по земле. На каждом конце линии устанавливается в. ч. пост 1, состоящий из передатчика ГВЧ, генерирующего токи высокой частоты, и принимающего их приемника ПВЧ. Выходная цепь в. ч. поста подключается одним зажимом к земле, а вторым — к линии электропередачи через кабель 2, фильтр присоединения 3 и конденсатор связи 4. По концам провода линии, используемого для передачи токов высокой частоты, устанавливаются заградители 5, запирающие выход токами высокой частоты за пределы линии.

Второй способ передачи высокочастотных сигналов по схеме «фаза — фаза» с использованием двух проводов линии требует больше аппаратуры и в Советском Союзе не применяется.

Часть энергии, генерируемой передатчиком, теряется в элементах канала, т. е. в кабеле, фильтрах присоединения, конденсаторах связи, проводах линии высокого напряжения, и уходит через заградители. Поэтому в. ч. передатчик должен с некоторым запасом перекрывать потери в канале, обеспечивая достаточный уровень мощности в. ч. сигнала, поступающего на приемник противоположного конца.

Потери энергии, происходящие при передаче в. ч. сигнала (рис. 12-4), называются **з а т у х а н и е м** и условно характеризуются величиной

$$b = \frac{1}{2} \ln \frac{P_{\text{вх}}}{P_{\text{вых}}}, \quad (12-1)$$

где $P_{\text{вх}}$ — мощность на входе рассматриваемого элемента канала (в начале элемента); $P_{\text{вых}}$ — мощность, получаемая на его выходе (в конце элемента).

За единицу затухания принимается **н е п е р** (Нп). Затухание каналов в. ч. защиты в зависимости от протяженности линии высокого напряжения колеблется от 1 до 2 Нп.



Рис. 12-4. К определению затухания в элементах высокочастотного канала [см. формулу (12-1)].

6) Высокочастотный пост

Для в. ч. защит линий 110 и 220 кВ отечественной промышленностью выпускаются в. ч. посты типа ПВЗК1Ж-581 на электронных лампах и посты на полупроводниках. Для линий 330—500 кВ, имеющих большое затухание

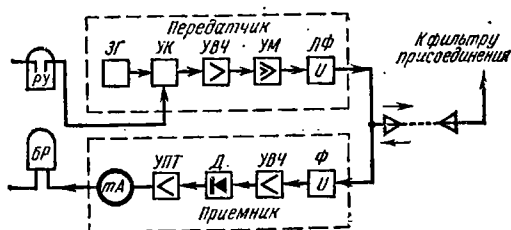


Рис. 12-5. Блок-схема высокочастотного поста.

и более высокий уровень помех, выпускаются посты с повышенной мощностью типа ПВЗД на электронных лампах, разработаны посты на полупроводниках типа ПВЗП [Ж. 55, 57]. Каждый в. ч. пост (рис. 12-5) состоит из передатчика и приемника.

Задающий генератор передатчика ЗГ является источником тока высокой частоты. Он (рис. 12-6) выполнен по индуктивной трехточечной схеме с квар-

цевым резонатором, обеспечивающим стабилизацию частоты (на рис. 12-6 не показан), и находится в режиме непрерывной работы. Мощность задающего генератора очень мала, поэтому устанавливаются промежуточный каскад УВЧ, являющийся усилителем напряжения, и усилитель мощности УМ. Линейный фильтр ЛФ служит для повышения входного сопротивления на частотах, отличных от рабочей частоты данного канала.

Пуск передатчика осуществляется подачей плюса постоянного тока на аноды и экранные сетки ламп усилителя мощности, а останов — подачей минуса на пентодную сетку лампы генератора. Управление передатчиком производится от релейной части защиты (реле РЖ). Входной сигнал, получаемый приемником, усиливается с помощью УВЧ, выпрямляется детекто-

ром D и затем после усиления усилителем постоянного тока УПТ поступает в блокирующее реле БР релейной части защиты.

Передатчик поста с повышенной мощностью в отличие от показанного на рис. 12-5 имеет дополнительный блок усиления.

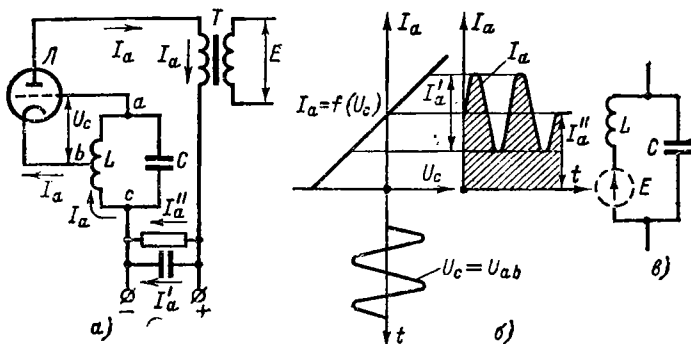


Рис. 12-6. Принципиальная схема задающего генератора (а) и зависимость его анодного тока от напряжения на сетке (б).

Все приемопередатчики рассчитаны на работу в диапазоне частот от 40 до 300 кГц. Генератор и приемник настраиваются на одну частоту.

Передатчики ПВЗК и ПВЗП имеют выходную мощность около 10 Вт при частоте 100 кГц и около 3—5 Вт при частоте 300 кГц. У передатчика ПВЗД отдаваемая мощность не менее 600 Вт.

в) Элементы высокочастотного канала

Конденсатор связи 4 (рис. 12-3) предназначен для присоединения поста к линии высокого напряжения. Сопротивление конденсатора

$x_C = \frac{1}{2\pi fC}$ зависит от частоты f проходящего через него тока. Для токов промышленной частоты 50 Гц оно велико (порядка 1 200 000 Ом), поэтому ток утечки весьма мал. При высоких частотах $f \geq 50$ кГц сопротивление x_C резко уменьшается. Отечественная промышленность выпускает бумажно-масляные конденсаторы типа СМР-55/ $\sqrt{3}$ -0,044. Они изготавливаются в виде элементов, рассчитанных на рабочее напряжение фазы 32 кВ и имеющих емкость $C = 18\,500$ пФ. На линиях 110 кВ устанавливаются два таких элемента, соединяемых последовательно, на линиях 220 кВ — четыре. Для линий 500 кВ выпускаются конденсаторы типа СМР $\frac{133}{\sqrt{3}} = 0,0186$; на таких линиях устанавливаются четыре элемента.

Высокочастотный кабель 2 (рис. 12-3). В качестве в. ч. кабеля используется кабель типа ФКБ, который является одножильным кордельным кабелем со свинцовой оболочкой и броней из стальной ленты. Входное сопротивление кабеля близко к 100 Ом, затухание 0,2 Нп на 1 км при частоте 100 кГц.

Фильтр присоединения 3 (рис. 12-3) согласовывает (уравновешивает) входное сопротивление кабеля с входным сопротивлением линии, соединяет нижнюю обкладку конденсатора связи с землей, образуя, таким образом, замкнутый контур для токов высокой частоты, и компенсирует емкость конденсатора связи, что позволяет уменьшить до минимума сопротивление конденсатора для токов высокой частоты.

Фильтр присоединения представляет собой воздушный трансформатор с отайками, позволяющими менять самоиндукцию его обмоток и взаимную

индукцию между ними. В цепи обмотки L_1 включен конденсатор связи C , а в цепи обмотки L_2 — конденсатор C_2 фильтра. Фильтр присоединения свободно пропускает токи только в определенном рабочем диапазоне частот. При этих частотах затухание фильтра относительно мало (порядка 0,15—0,25 Нп), а за пределами рабочих частот резко возрастает. Фильтр присоединения ОФП-4, выпускаемый отечественной промышленностью, выполняется на три диапазона, охватывающие частоты 50—300 кГц. Для линий 500 кВ выпускается фильтр ОКФП-500, рассчитанный на работу с конденсатором емкостью 525 пФ.

Параллельно обмотке L_1 фильтра включается разрядник P . При пробое конденсатора связи при перекрытии его изоляции разрядник срабатывает и создает надежный путь для отвода в землю токов к. з.

Заградитель 5 (рис. 12-3) преграждает выход токов высокой частоты за пределы линии. Сопротивление заградителя $z_{згр}$ зависит от частоты f . Для токов высокой частоты, передаваемых по данному каналу, $z_{згр}$ велико, а для токов промышленной частоты (50 Гц) оно очень мало.

Заградитель представляет собой резонансный контур (рис. 12-7, а), настроенный на определенную частоту — частоту в. ч. поста; он состоит из силовой индуктивной катушки L_K и элемента настройки, выполненного в виде регулируемой емкости C .

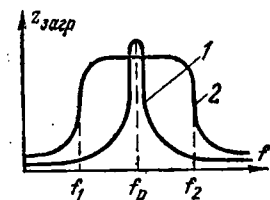


Рис. 12-8. Резонансные характеристики заградителей.

1 — резонансного; 2 — широкополосного.

Выпускаемые отечественной промышленностью заградители КЗ-500 рассчитаны на рабочий ток 700 А с пределами настройки 50—300 кГц.

Кроме резонансных, применяются широкополосные заградители (рис. 12-7, б и 12-8), запирающие токи в довольно широком диапазоне частот f_1 — f_2 . Такие заградители нужны для каналов, по которым одновременно передается несколько сигналов с разными частотами.

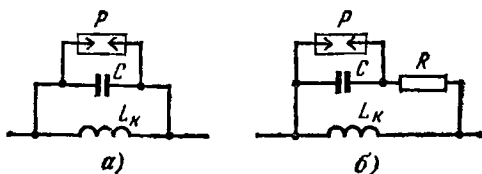


Рис. 12-7. Высокочастотный заградитель.

а — резонансный (одночастотный); б — широкополосный.

Величина C подбирается так, чтобы контур заградителя был настроен в резонанс (тока) на заданную частоту f_p , т. е. чтобы $\omega L_K = 1/\omega C$. Такой заградитель называется резонансным или одночастотным. При резонансной частоте сопротивление контура имеет максимальное значение (рис. 12-8) и носит активный характер.

Резонансное сопротивление заградителя должно быть не меньше 1000 Ом. Для защиты конденсатора C от грозовых и коммутационных перенапряжений устанавливается разрядник P . Силовая катушка заградителя рассчитывается на прохождение рабочих токов нагрузки и тока к. з.

12-4. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА С ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ БЛОКИРОВКОЙ

а) Основные элементы защиты

Упрощенная схема, поясняющая принцип выполнения и действия направленных в. ч. защит, показана на рис. 12-9. Защита состоит из трех основных элементов: пускового органа, органа направления мощности и блокирующего реле B .

получаемым из анодной цепи приемника, и действует на размыкание контактов реле. При одновременном питании рабочей и тормозной обмоток реле не действует, так как тормозной момент преобладает над рабочим.

б) Работа защиты в различных режимах

При внешнем к. з. на обоих концах линии срабатывают пусковые реле P_1 и P_2 . Они пускают передатчики и подают плюс к контактам реле мощности M . На питающем конце линии, где мощность к. з. направлена от шин в линию, реле мощности срабатывает, останавливает передатчик своего комплекта, подает плюс к контактам блокирующего реле B и ток в его рабочую обмотку, подготавливая, таким образом, защиту к действию. Однако цепь отключения защиты остается разомкнутой контактами блокирующего реле, в тормозную обмотку которого поступает блокирующий ток с противоположного конца линии. На противоположном (ближнем к месту повреждения) конце линии мощность к. з. направлена к шинам, поэтому реле мощности на этом конце линии не действует, разрешая реле P_2 запустить передатчик, который посылает блокирующий ток высокой частоты. Этот ток, принятый и выпрямленный приемниками обоих постов, поступает в тормозные обмотки блокирующих реле B и не позволяет им действовать. Благодаря этому предотвращается срабатывание защиты на питающем конце линии и дополнительно осуществляется блокировка защиты на приемном конце линии, цепь отключения которой уже разомкнута контактами реле мощности. Таким образом, при внешнем к. з. блокирующий высокочастотный импульс посылается только с того конца линии, где контакты реле мощности разомкнуты, что и обеспечивает селективность защиты.

При к. з. в зоне двустороннего питания места повреждения мощность к. з. на обоих концах линии направлена от шин в линию. В обоих комплектах защиты срабатывают пусковые реле P_1 и P_2 и реле мощности M . Реле мощности размыкают при помощи промежуточного реле PP цепь пуска в. ч. поста. Вследствие бездействия обоих передатчиков ток высокой частоты отсутствует и блокирующие реле срабатывают, разрешая защите произвести отключение линии.

При качаниях, обычно сопровождающихся возрастанием тока и снижением напряжения, пусковые реле тока и сопротивления могут приходить в действие. Поэтому поведение защиты в этих условиях будет зависеть от поведения реле мощности, которое зависит от положения точки электрического центра качаний. Если последний окажется в пределах защищаемой линии (см. §13-2), то знаки мощности по ее концам будут положительными (т. е. направленными от шин в линию). В этом случае защита подействует неправильно и отключит линию. На всех остальных участках сети, где электрический центр расположен вне линии, направления мощ-

ности по их концам будут различными и защита будет блокироваться, как и в условиях внешних к. з.

Для предотвращения неправильных отключений применяется специальная блокировка, запрещающая работать защите при качаниях (см. § 13-3).

Пусковые реле, реагирующие на составляющие нулевой или обратной последовательностей, при качаниях, возникающих в симметричном режиме, не действуют, поэтому для таких защит блокировок от качаний не требуется.

в) Особенности пускового органа защиты

Из принципа действия защиты и работы схемы следует, что *непрерывным условием правильной работы защиты при внешних к. з. является пуск высокочастотного передатчика на ближнем к месту к. з. (т. е. приемном) конце линии.* При несогласованной чувствительности пусковых реле на противоположных концах линии это условие может быть нарушено. Так, например, если при внешнем к. з. реле Π_2 (рис. 12-9), пускающее в. ч. передатчик на приемном конце линии, не сработает из-за недостаточной чувствительности, а реле Π_1 , пускающее защиту на питающей стороне линии, окажется более чувствительным и подействует, то защита на питающем конце неправильно отключит линию из-за отсутствия блокирующего сигнала с приемного конца.

Для исключения этого пусковой орган выполняется из двух комплектов реле: одного — Π_2 для пуска высокочастотной части и второго — Π_1 в цепи отключения. При этом реле Π_2 должно быть в 1,5—2 раза чувствительнее реле Π_1 на своем и противоположном концах линии. При выполнении этого условия имеется полная гарантия, что более чувствительные реле Π_2 обеспечат пуск в. ч. передатчика, если пришли в действие более грубые пусковые реле Π_1 в цепи отключения. Такой принцип пуска предусмотрен в схеме, показанной на рис. 12-9.

Имеется и второй способ, при котором пусковой орган состоит из одного комплекта, управляющего как высокочастотной, так и релейной частями защиты. В этом случае пусковые реле на каждом конце линии пускают в. ч. пост своего комплекта и одновременно осуществляют пуск поста на противоположной стороне линии. Такой принцип пуска получил название *дистанционного*; схема его выполнения рассматривается в § 12-5.

При дистанционном пуске несогласованность в чувствительности пусковых реле на любом конце линии не представляет опасности, так как при работе одного пускового реле запускаются оба поста и блокирующий импульс с приемного конца линии будет, таким образом, обеспечен, даже если установленное там пусковое реле не подействует.

Уставки пусковых реле. Оба пусковых комплекта реле Π_1 и Π_2 должны быть отстроены от максимальной нагрузки

(если они на нее реагируют) и надежно действовать при к. з. на противоположном конце защищаемой линии. Токовые реле отстраиваются от нагрузки по формуле

$$I_{с.з.} = \frac{k_n}{k_{воз}} I_{н. макс}, \quad (12-2)$$

а реле сопротивления — по формуле

$$z_{с.з.} = \frac{1}{k_n k_{воз}} z_{раб. мин}, \quad (12-3)$$

при $\varphi_p = \varphi_{нагр}$. В обоих случаях $k_n > 1$.

Исходя из этого уставка пусковых реле Π_2 , пускающих в ч. передатчик, выбирается по выражению (12-2) или (12-3), а уставки пусковых реле Π_1 , управляющих цепью отключения, принимаются в 1,5—2 раза грубее уставок на Π_2 по соображениям, приведенным выше.

Чувствительность реле, управляющих отключением, проверяется по к. з. на противоположном конце линии, коэффициент чувствительности должен быть в худшем случае не меньше 1,5—2.

По принципу своего действия защита не реагирует на перегрузки, поскольку в этом режиме мощности по концам линии имеют разные направления, так же как и при внешнем к. з. Поэтому для повышения чувствительности можно не считаться с маловероятными или кратковременными перегрузками (например, токами самозапуска и т. п.) и отстраивать реле Π_2 от нормальной нагрузки. При этом пусковые реле Π_1 , управляющие цепью отключения, должны быть отстроены от максимальной нагрузки.

Реле, питающиеся от фильтра тока или напряжения нулевой и обратной последовательностей, на нагрузку не реагируют, но их необходимо отстраивать от небаланса, возможного в условиях нагрузки. Величину небаланса оценивают на основании данных опыта и проверяют непосредственным измерением при включении защиты.

г) Контроль исправности высокочастотного канала и передатчиков

Нарушение высокочастотного канала или неисправности в постах, в частности повреждение электронных ламп, приводят к неправильной работе защиты при внешних к. з. В связи с этим в схеме защиты предусматривается устройство контроля за исправностью высокочастотной аппаратуры. Для этой цели установлены кнопка K и миллиамперметр mA (рис. 12-9). Периодически дежурный персонал, нажимая кнопку K , пускает передатчик и по показанию миллиамперметров, установленных в выходной цепи приемников, проверяет величину тока приема на обоих концах линии. Цепь от кнопки K заводится через контакты реле ΠP , с тем чтобы проверка не препятствовала правильной работе защиты, если во

время ее проведения возникает внешнее к. з. За последнее время разработаны и применяются автоматические устройства для проверки исправности канала с пуском от часов в определенное время суток.

12-5. РАЗНОВИДНОСТИ НАПРАВЛЕННЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ И ИХ СХЕМЫ

а) Направленная защита с высокочастотной блокировкой

Защита состоит из двух комплектов: одного от междуфазных к. з., сравнивающего направление мощности в фазах, и второго от замыканий на землю, реагирующего на знак мощности нулевой последовательности. Каждый комплект выполняется по схеме, приведенной на рис. 12-9. В комплекте от междуфазных к. з. в качестве органа мощности M служат реле мощности, включенные на ток фазы и соответствующее напряжение (по принятым схемам), а в качестве пусковых реле $П_1$ и $П_2$ используются реле, реагирующие на ток или сопротивление фазы.

Комплект от замыканий на землю выполняется при помощи реле мощности, включенного на мощность нулевой последовательности. Пусковыми реле служат токовые реле, реагирующие на ток нулевой последовательности.

При к. з. на землю предусматривается блокировка междуфазного комплекта для предупреждения неправильного действия его под влиянием токов в неповрежденных фазах. Комплект от междуфазных к. з. должен иметь блокировку от качаний, а в защитах с пуском от реле сопротивлений — и блокировку от неисправностей в цепях напряжения.

Несмотря на простоту принципа действия, полные схемы подобных защит получаются достаточно многорелейными и сложными. При этом нужно учитывать, что по своему принципу действия направленная защита с в. ч. блокировкой не реагирует на к. з. за пределами защищаемой линии, поэтому ее приходится дополнять резервными защитами, что еще больше усложняет исполнение защиты. В большинстве случаев в качестве резервной защиты используются дистанционная защита от междуфазных к. з. и ступенчатая защита нулевой последовательности от замыканий на землю.

б) Дистанционная защита в сочетании с высокочастотной блокировкой

Дистанционная защита имеет органы направления мощности (самостоятельные или в сочетании с дистанционными) и пусковые реле.

Используя эти элементы и добавляя к ним блокирующее реле и высокочастотную часть, можно получить комбинированную защиту, выполняющую функции основной и резервной защит,

с меньшим числом реле, чем в предыдущем варианте. Блокирующее реле в схеме комбинированной защиты шунтирует реле времени второй зоны, разрешая защите действовать без выдержки времени, при к. з. на защищаемой линии.

Такая комбинированная защита при помощи в. ч. блокировки обеспечивает мгновенное двустороннее отключение к. з. в пределах защищаемой линии. Комплект же дистанционной защиты позволяет отключать к. з. на шинах, резервировать защиты следующего участка, а также служит резервом при к. з. на защищаемой линии в случае отказа в. ч. блокировки или ее отсутствия.

Характеристика дистанционной защиты с в. ч. блокировкой приведена на рис. 12-10, штриховкой отмечено ускорение, достигаемое с помощью в. ч. блокировки.

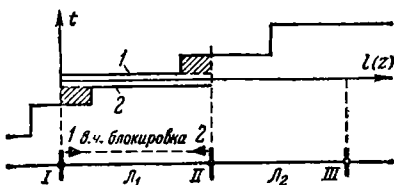


Рис. 12-10. Характеристика дистанционной защиты с высокочастотной блокировкой.

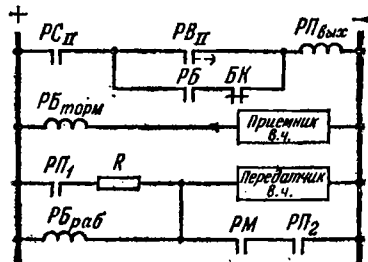


Рис. 12-11. Принципиальная схема дистанционной защиты в сочетании с высокочастотной блокировкой (для одной фазы).

Общий принцип исполнения таких схем можно уяснить из рис. 12-11.

Пусковые реле $РП_1$ и $РП_2$ и орган направления мощности $РМ$ (или направленный дистанционный орган) дистанционной защиты управляют работой в. ч. поста (генератора и приемника) и блокирующего реле $РБ$, как показано на схеме. При к. з. на защищаемой линии, когда в. ч. генераторы с обеих сторон линии остановлены, блокирующее реле $РБ$ шунтирует контакты реле времени $РВ_{II}$ второй (или третьей) зоны дистанционной защиты и она срабатывает без выдержки времени. При внешнем к. з. блокирующее реле не действует и защита работает как дистанционная, резервируя следующий участок сети с помощью второй и третьей зон.

Для предупреждения неправильной работы при качаниях цепь блокирующего реле заведена через контакты блокировки от качаний $БК$ дистанционной защиты.

По рассмотренной схеме выполняется сочетание дистанционной защиты ПЗ-158 и ПЗ-2 с в. ч. блокировкой. В качестве чувствительного пускового реле $РП_1$, пускового в. ч. генератора, используются пусковые реле блокировки от качаний, реагирующей на появление I_2 и I_0 или U_2 и U_0 . Органом, контролирующим направление мощности $РМ$, служат направленные дистанционные реле третьей зоны. Одновременно эти реле выполняют функции в-

рого (более грубого) пускового реле $РП_2$, пускающего блокирующее реле $РВ$ и замыкающего цепь останова в. ч. генератора.

Для осуществления в. ч. блокировки панель дистанционной защиты дополняется приставкой, которая содержит блокирующее реле $РБ$.

Поскольку дистанционная защита используется в Советском Союзе только как защита от междуфазных к. з., необходимо предусматривать аналогичное сочетание резервной защиты нулевой последовательности с в. ч. блокировкой. Полная схема подобной защиты дана на рис. 12-12. Жирными линиями показаны дополнения, обусловленные в. ч. блокировкой.

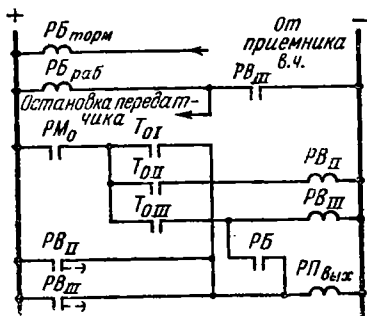


Рис. 12-12. Принципиальная схема направленной защиты нулевой последовательности в сочетании с высокочастотной блокировкой.

Преимущество комбинированного исполнения направленной в. ч. защиты с резервной заключается в уменьшении числа реле, на что уже указывалось выше. Недостатком совмещения резервной и основной защит является отсутствие взаимного резервирования между ними, имеющее место при раздельном исполнении.

в) Фильтровая направленная защита с высокочастотной блокировкой

В фильтровых защитах орган направления мощности и орган пуска реагируют на составляющие обратной последовательности. Такое исполнение защиты дает ряд преимуществ.

Фильтровые защиты получают односторонними (с одним реагирующим органом на три фазы), они не реагируют на нагрузку и качания в симметричных режимах и обладают высокой чувствительностью. В СССР разработаны фильтровые защиты от несимметричных к. з. и от всех видов повреждений.

Фильтровые защиты от несимметричных повреждений отличаются особой простотой. Они могут выполняться с одним реле мощности, совмещающим в себе функции органа мощности и органа пуска. На рис. 12-13 представлена схема с реле мощности $М$ двустороннего действия. Реле $М$ включено на ток и напряжение обратной последовательности через соответствующие фильтры. Вторым элементом схемы является блокирующее реле $РБ$, действующее, как и в предыдущих схемах. При внешнем к. з. реле мощности на приемном конце линии замыкает контакты 2 и пускает в. ч. генератор, который посылает блокирующий импульс на питающий конец линии, где реле мощности $М$ замыкает контакт 1. Блокирующее реле $РБ$ не позволяет защите работать на отключение.

При к. з. в зоне реле мощности на обоих концах линии замыкают контакты I , в. ч. генераторы бездействуют и реле $PБ$ срабатывает на отключение с обеих сторон линии.

При симметричных к. з. защита не действует. Для устранения этого дефекта защиту можно дополнить комплектом от трехфазных к. з.

Фильтровая защита от всех видов к. з. Известно два варианта ее исполнения: с реле мощности обратной последовательности, переключаемым при симметричных к. з. на мощность фазы, и с трехфазным быстродействующим реле мощности обратной последовательности, реагирующим и при симметричных к. з. на мощность S_2 , возникающую в начале к. з. Последний вариант разработан ВНИИЭ для линий 750 кВ.

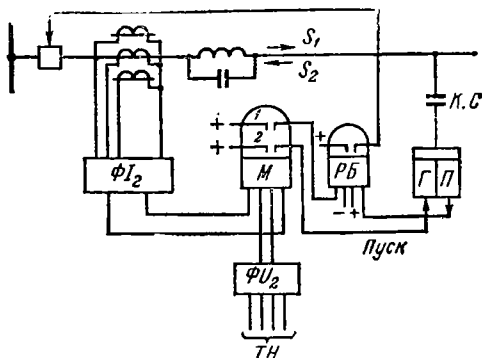


Рис. 12-13. Фильтровая направленная высокочастотная защита с двусторонним реле мощности.

Защита по первому варианту основана на следующих принципах [Л. 23]:

1. В качестве органа направления мощности используется одно реле, включенное на мощность обратной последовательности, которое при трехфазных к. з. переключается пусковым органом на фазный ток и линейное напряжение.

2. Пуск релейной и в. ч. частей защиты осуществляется одним реле при всех видах к. з. Это реле реагирует на появление U_2 или I_2 . Чтобы обеспечить действие защиты при трехфазных к. з., пусковой орган фиксирует (запоминает) на некоторое время появление кратковременной несимметрии, возникающей в начале трехфазного повреждения. Схема пускового органа с фиксацией кратковременного действия пускового реле H_2 приведена на рис. 12-14.

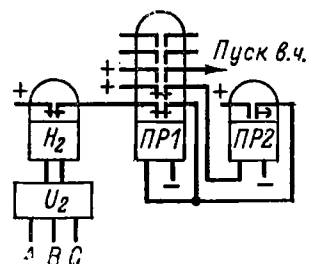


Рис. 12-14. Принципиальная схема пускового органа фильтровой высокочастотной защиты.

отпадает, производя пуск защиты. Одновременно реле $ПР1$ замыкает цепь своей обмотки и вследствие этого не может возвратиться в исходное положение до тех пор, пока в его обмотку не будет подан ток контактами реле $ПР2$. Как видно из схемы (рис. 12-14), нормально реле $ПР2$ питается током и находится в подтянутом состоянии. При действии $ПР1$ ток в реле прерывается и оно отпадает с выдержкой времени порядка 0,3—0,5 с, при этом контакт $ПР2$ замыкается и подает ток в реле $ПР1$, возвращая его в нормальное положение. Благодаря особенностям схемы пуска $ПР1$, оно отзывается на любое кратковременное действие реле H_2 , фиксируя появление U_2 в начальный

момент трехфазного к. з. на время (0,3—0,5 с), достаточное для действия защиты.

При двухфазных и однофазных повреждениях U_2 появляется на все время к. з., действие схемы в этом случае понятно из чертежа (рис. 12-14).

3. Дистанционный пуск генератора в. ч. При действии пускового реле на одном конце линии с помощью специальной схемы (рис. 12-15, а) производится дистанционный пуск генератора высокой частоты на противоположной стороне. Дистанционный пуск осуществляется с помощью промежуточного реле $РП1$, включенного на ток $I_{бл}$ приемника высокой частоты $П$, и второго вспомогательного реле $РП2$ для возврата схемы. При пуске генератора на противоположном конце

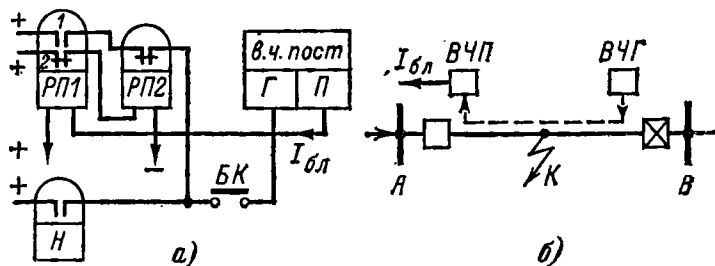


Рис. 12-15. Дистанционный пуск передатчика на противоположном конце линии.

а — схема; б — возможность отказа защиты при одностороннем питании.

линии приемник данной стороны принимает высокочастотный сигнал и дает ток в реле $РП1$. Последнее срабатывает и контактом I пускает генератор $Г$ на данном конце линии. При этом реле $РП1$ получает питание от этого же генератора и поэтому само по себе не может возвратиться в исходное положение. Для возврата реле $РП1$ и прекращения пуска генератора служит реле $РП2$. Оно срабатывает (отпадает) при действии реле $РП1$ и размыкает с замедлением порядка 0,4 с цепь пуска генератора.

Дистанционный пуск может привести к отказу защиты при одностороннем питании поврежденной линии (рис. 12-15, б), если к. з. на приемном конце линии $В$ отключается раньше, чем на питающем $А$, или если линия в момент повреждения находилась под напряжением. В этих случаях генератор в. ч. на приемном (отключенном) конце линии, запущенный дистанционно, посылает импульс в. ч., блокирующий защиту на питающем конце, не давая ей работать. Для исключения этого недостатка цепь пуска генератора заведена через блок-контакты $БК$ выключателя (рис. 12-15, а). При отключении выключателя блок-контакты размыкаются и возможность пуска в. ч. генератора исключается.

12-6. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА

а) Принцип действия

Дифференциально-фазная высокочастотная защита основана на сравнении фаз тока по концам защищаемой линии.

Считая положительными токи, направленные от шин в линию, находим, что при внешних к. з. в точке K_1 (рис. 12-16, а) токи I_m и I_n по концам защищаемой линии имеют различные знаки и, следовательно, их можно считать сдвинутыми по фазе на 180° .

В случае же к. з. на защищаемой линии (рис. 12-16, б) токи на ее концах имеют одинаковые знаки и их можно принять совпадающими по фазе, если пренебречь сдвигом векторов э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ по концам электропередачи и различием углов полных сопротивлений z_m и z_n .

Таким образом, сравнивая фазы токов по концам линии, можно установить местоположение к. з. В обычных схемах дифференциальных защит сравнение фаз токов осуществляется в дифференциальных реле путем непосредственного сравнения токов, проходящих в начале и конце линии; в дифференциально-фазовой в. ч. защите сравнение фаз осуществляется косвенным путем посредством токов высокой частоты.

Упрощенная схема, иллюстрирующая работу дифференциально-фазовой защиты, и диаграмма, поясняющая принцип ее действия, приведены на рис. 12-17 и 12-18.

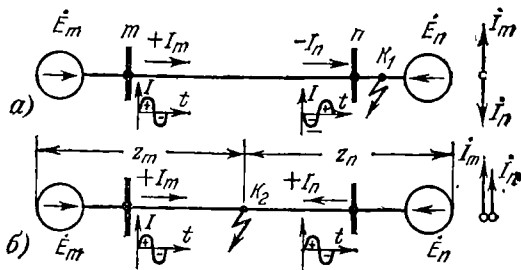


Рис. 12-16. Принцип действия дифференциально-фазовой высокочастотной защиты.

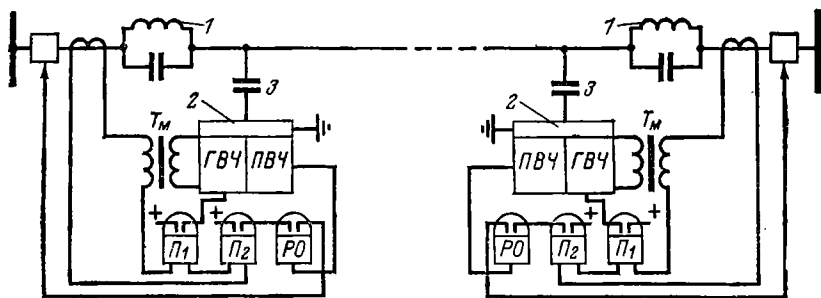


Рис. 12-17. Упрощенная принципиальная схема дифференциально-фазовой высокочастотной защиты.

Защита состоит из приемопередатчика, включающего в себя в. ч. генератор ГВЧ, приемник ПВЧ, реле отключения РО, питающегося током приемника, и двух пусковых реле П₁ и П₂, одно из которых пускает ГВЧ, а второе контролирует цепь отключения защиты. Токи высокой частоты передаются по каналу, образованному проводом линии высокого напряжения и землей. Выход токов в. ч. за пределы линии ограничивается заградителями 1, подключение в. ч. постов 2 осуществляется через конденсаторы связи 3.

Особенность защиты заключается в том, что в. ч. генератор управляется (манипулируется) непосредственно

токами промышленной частоты при помощи специального трансформатора T_m . Генератор включен так, что при положительной полуволне промышленного тока он работает, посылая в линию ток высокой частоты, а при отрицательной — запирается и ток высокой

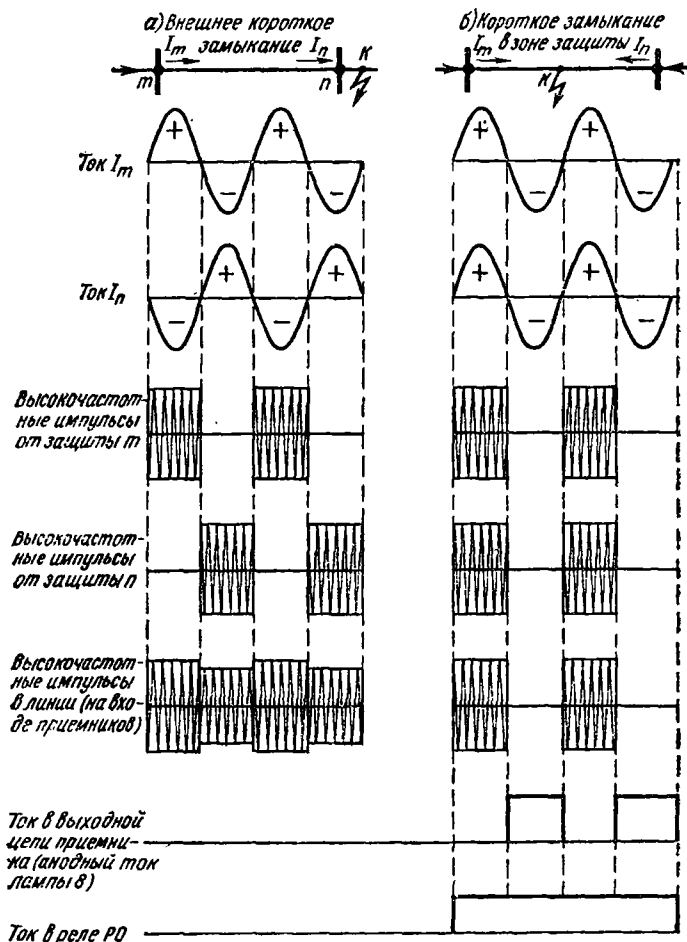


Рис. 12-18. Диаграмма токов в дифференциально-фазной высокочастотной защите.

частоты прекращается. В то же время приемник выполнен таким образом, что при наличии токов высокой частоты, поступающих в его входной контур, выходной ток, питающий реле PO , равен нулю, а при отсутствии в. ч. сигнала появляется выходной ток, который поступает в реле PO . Таким образом, генератор высокой частоты работает только в течение положительных полупериодов

тока промышленной частоты, а приемник — при отсутствии в ч. сигналов.

При внешнем к. з. (рис. 12-18, а), когда фазы первичных токов по концам линии противоположны, генератор на конце линии *т* работает в течение первого полупериода промышленного тока, а на конце *п* — в течение следующего полупериода. Ток высокой частоты протекает по линии непрерывно и питает приемники на обеих сторонах линии. В результате этого выходной ток в цепи приемника и реле *РО* отсутствует, и реле (защита) не работает.

При к. з. в зоне (рис. 12-18, б) генераторы на обоих концах линии работают одновременно, поскольку фазы токов по концам линии совпадают. Высокочастотный ток, поступающий при этом в приемники, будет иметь прерывистый характер с интервалами времени, равными полупериоду промышленного тока. В этом случае приемник работает в промежутки времени, когда ток высокой частоты отсутствует, и заперт (не работает) во время его прохождения. В выходной цепи приемника появляется прерывистый ток, который сглаживается специальным устройством и подается в реле *РО*. Последнее срабатывает и отключает линию.

Таким образом, сдвиг фаз между токами, проходящими по обоим концам линии, определяется по характеру в. ч. сигналов (с п л о ш н ы е и л и п р е р ы в и с т ы е), на которые при помощи приемника реагирует реле *РО*.

По принципу своего действия дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку и качания, так как в этих режимах токи на обоих концах линии имеют разные знаки.

б) Основные органы дифференциально-фазной защиты и особенности их выполнения

Дифференциально-фазная защита состоит (рис. 12-17) из трех основных элементов: п у с к о в о г о о р г а н а I_1 и I_2 , пускающего передатчик и разрешающего действовать защите при к. з.; о р г а н а м а н и п у л ь ц и и, управляющего (с помощью T_m) передатчиком токов высокой частоты в зависимости от знака сравниваемых токов, и о р г а н а с р а в н е н и я ф а з т о к о в, действующего на отключение при совпадении фаз токов, проходящих по концам линии.

Дифференциально-фазная защита не реагирует на нагрузку, поэтому пусковой орган в схемах этой защиты не является обязательным. Однако при его отсутствии любое нарушение непрерывной циркуляции токов высокой частоты будет приводить к срабатыванию реле *РО* и ложному отключению линии. Поэтому во всех схемах, дифференциально-фазной защиты применяются пусковые реле, отстроенные от токов нагрузки.

К особенностям выполнения органов защиты относятся:

1) одновременный пуск в. ч. передатчиков на обоих концах защищаемой линии при внешних к. з.

При удаленных внешних к. з., когда пусковые реле, пускающие в. ч. передатчик, работают на пределе своей чувствительности, возможна работа пускового органа только с одной стороны линии. Тогда ток высокой частоты будет прерывистым и защита подействует ложно. Для исключения этого пусковой орган защиты выполняется из двух комплектов: одного — чувствительного, пускающего высокочастотный передатчик, и второго — более грубого (в 1,5—2 раза), управляющего цепью отключения.

2) Нарушение непрерывности высокочастотного сигнала при внешних к. з. и качаниях может возникнуть также вследствие неодновременного действия реле, пускающих передатчики, установленных на противоположных концах линии. Поэтому пуск в. ч. передатчиков при внешних к. з. должен осуществляться несколько раньше, чем срабатывает реле PO , замыкающее цепь отключения защиты, а останов их должен происходить несколько позже возврата пусковых реле, управляющих цепью отключения¹.

3) Выполнение дифференциально-фазных защит, сравнивающих токи в каждой фазе, получается весьма сложным и дорогим.

Защита значительно упрощается и становится более надежной, если вместо токов фаз сравнивать их симметричные составляющие, получаемые от фильтров, преобразующих трехфазную систему токов в однофазную. В качестве фильтра в защитах этого типа используются комбинированные фильтры, на выходе которых получается ток $\dot{I}_f$, пропорциональный $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$.

Подобные фильтры обеспечивают действие защиты при всех видах к. з.

В случае симметричных к. з. ток фильтра обуславливается составляющей I_1 , а при несимметричных к. з. — составляющими I_1 и I_2 или I_1 и I_0 .

в) Искажение фаз сравниваемых токов (фазовые погрешности)

При рассмотрении принципа действия защиты предполагалось, что при внешних к. з. токи I_m и I_n по концам защищаемой линии сдвинуты по фазе на угол $\psi = 180$, а при к. з. в зоне — совпадают по фазе, т. е. $\psi = 0$ (рис. 12-16 и 12-18).

В действительности из-за погрешности трансформаторов тока и ряда других причин (отмечаемых дальше) фазы вторичных токов искажаются, и поэтому сдвиг фаз ψ между токами на обоих концах линии отличается от указанных выше значений. При больших искажениях фаз токов I_m и I_n возможны неправильные действия защиты при внешних к. з. и отказ в работе — при к. з. в зоне. В связи с этим параметры защиты выбираются так, чтобы она блокировалась в условиях внешнего к. з. при $\psi = 180 - \beta$ и рабо-

¹ При к. з. в зоне передатчик на отключившемся конце линии должен немедленно останавливаться для предупреждения блокировки защиты противоположной стороны.

тала при к. з. в зоне при $\psi > 0$. Предельное значение угла β , при котором защита должна блокироваться, называется углом блокировки защиты (см. рис. 12-26). Для уменьшения искажений фаз I_m и I_n трансформаторы тока, питающие дифференциально-фазную защиту, должны выбираться по 10%-ным характеристикам, при этом угловая погрешность каждого трансформатора тока не будет превышать 7%.

При к. з. в зоне кроме погрешности трансформаторов тока, искажающих фазы токов, имеется расхождение фаз первичных токов $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ вследствие различия фаз между э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ эквивалентных генераторов (рис. 12-19, а); разницы углов полных

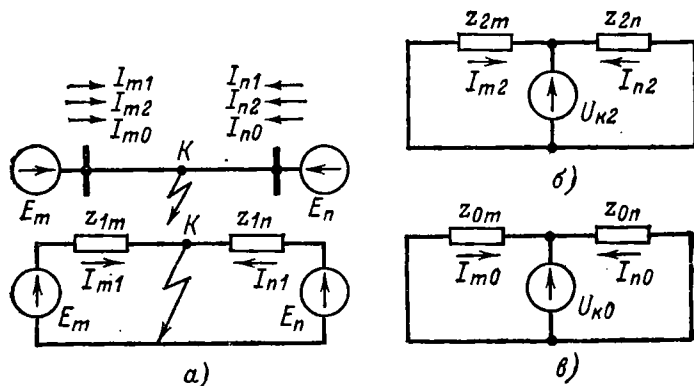


Рис. 12-19. Схемы замещения симметричных составляющих.

а — прямой; б — обратной и в — нулевой последовательностей.

сопротивлений z_m и z_n в схемах замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей (рис. 12-19, а, б, в) и наложения токов нагрузки на токи к. з.

Токи прямой последовательности (рис. 12-19, а) $\dot{I}_{m1} = \frac{\dot{E}_m}{z_{1m}}$, а $\dot{I}_{n1} = \frac{\dot{E}_n}{z_{1n}}$. Их фазы зависят от фаз э. д. с. $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$. С учетом их различия, а также влияния нагрузки и несовпадения углов z_{1m} и z_{1n} сдвиг фаз ψ_1 между I_{1m} и I_{1n} отличается от нуля $\psi_1 \neq 0$.

Фазы токов обратной и нулевой последовательности на обоих концах линии определяются одним и тем же напряжением в месте к. з. ($\dot{U}_{K2}$ или $\dot{U}_{K0}$), расхождение фаз $\dot{E}_m$ и $\dot{E}_n$ на эти составляющие не влияет.

Искажение, обусловленное различием углов сопротивлений, не велико, поэтому практически токи I_{2m} и I_{2n} , а также I_{0m} и I_{0n} можно считать совпадающими по фазе.

Таким образом, сдвиг фаз между сравниваемыми токами $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ или $\dot{I}_1 + k\dot{I}_0$ на каждом конце линии определяется в основ-

ном различием фаз токов прямой последовательности I_{1m} и I_{1n} . Учитывая это, коэффициент k выбирается возможно большим с тем, чтобы при несимметричных к. з. влияние тока I_1 на фазу суммарного тока было наименьшим. Искажение фаз токов I_m и I_n при внешних к. з. рассмотрено в § 12-8.

12-7. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНАЯ ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ ЗАЩИТА ТИПА ДФЗ-2

Защита типа ДФЗ-2 [Л. 55, 57] предназначена для линий 110 в 220 кВ в качестве основной быстродействующей защиты от всех видов к. з. Принцип действия защиты основан на сравнении фаз токов $I_1 + kI_2$ по концам защищаемой линии. Схема защиты построена аналогично принципиальной схеме, приведенной на

рис. 12-17. Защита имеет три органа: пусковой, манипуляции и сравнения фаз.

Пусковой орган состоит из двух комплектов — один, более чувствительный пускает в. ч. пост, а второй управляет цепью отключения и реле сравнения PO . Оба комплекта приходят в действие только при появлении токов обратной и нулевой последовательностей, благодаря этому они не реагируют на нагрузку и обладают высокой чувствительностью.

Пусковые реле реагируют на ток обратной и нулевой последовательностей I_2 и I_0 . Такой пуск обеспечивает высокую чувствительность при к. з. и недействие защиты при нагрузке и качаниях.

Для обеспечения их действия при трехфазных к. з.

пусковой орган выполнен по схеме, позволяющей фиксировать кратковременную несимметрию, возникающую в первый момент трехфазного к. з. Фиксация осуществляется по схеме, аналогичной применяемой в фильтровой защите (рис. 12-14). В схеме защиты предусмотрены дополнительные пусковые реле, обеспечивающие правильное действие защиты при трехфазных к. з. Эти реле реагируют на ток фазы и сопротивление z_1 . Орган манипуляции подключается на токи линии через комбинированный фильтр

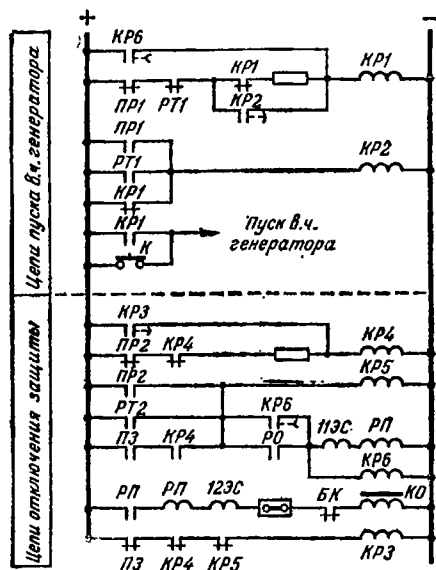


Рис. 12-20. Схема цепей постоянного тока дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2. Контакты реле показаны в рабочем положении.

Φ_M (рис. 12-21), на выходе которого появляется напряжение $U_M = k' (\dot{I}_1 + k \dot{I}_2)$, управляющее работой генератора высокой частоты.

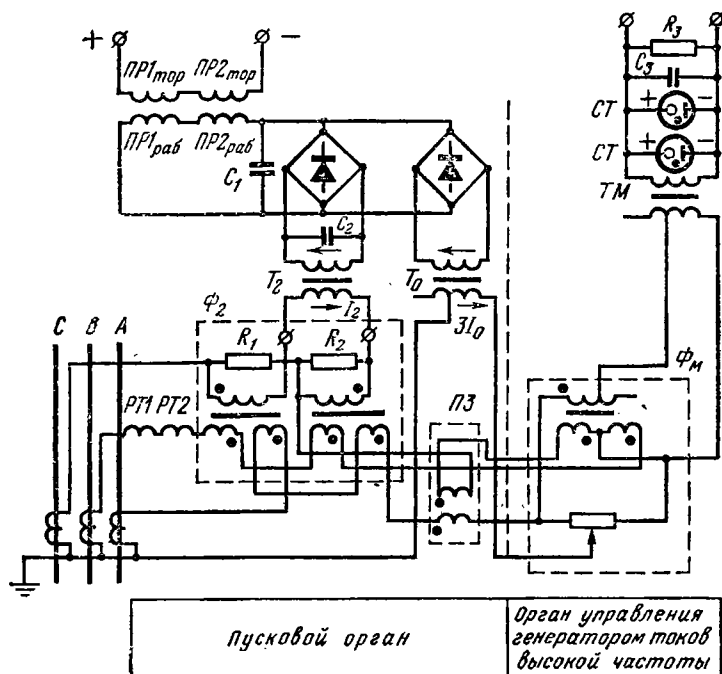


Рис. 12-21. Схема цепей переменного тока дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2.

Релейная часть может работать совместно с в. ч. постом типа ПВЗК — на электронных лампах или с постом ПВЗП — на полупроводниках [Л. 55, 57].

Ниже более подробно рассматриваются устройства отдельных элементов защиты и ее схема (рис. 12-20—12-22).

Пусковой орган защиты. Комплект, пускающий в. ч. пост, состоит из двух реле $PP1$ и $PT1$ и промежуточных реле $KP1$ и $KP2$ (рис. 12-20), осуществляющих фиксацию появления I_2 и I_0 . Комплект, управляющий релейной частью защиты, выполняется с помощью трех реле $PP2$, $PT2$, $P3$ и промежуточных реле $KP4$ и $KP3$, служащих для осуществления схемы фиксации.

Реле $PP1$ и $PP2$ являются основными пусковыми реле, действующими при всех видах к. з. Они питаются выпрямленным током от фильтра тока обратной и нулевой последовательностей (рис. 12-21).

Реле $PT1$, $PT2$ и $P3$ являются дополнительными и предназначены для действия при трехфазных к. з. На длинных линиях в качестве $P3$ применяется направленное реле сопротивления типа КРС-131. На средних и коротких линиях используется реле минимального напряжения, если оно обеспечивает необходимую чувствительность.

Реле $PT1$ и $PT2$ являются токовыми типа РТ-40, включенными на ток одноименной фазы.

Пуск в. ч. генератора производится от контактов реле $KP1$, которое приводится в действие пусковым реле $ПП1$ или $PT1$. Обмотка $KP1$ в нормальных условиях обтекается током, а контакты в цепи пуска генератора разомкнуты (рис. 12-20). При появлении несимметрии (т. е. токов I_2 и I_0) реле $ПП1$ размыкает цепь обмотки $KP1$, реле $KP1$ отпадает и пускает генератор, подавая на него плюс.

Одновременно вторым контактом реле $KP1$ размыкает цепь своей обмотки, исключая этим возможность возврата реле при исчезновении кратковременной несимметрии и фиксируя, таким образом, ее появление.

Возврат реле $KP1$ и прекращение работы высокочастотного генератора происходят при помощи реле $KP2$. Это реле срабатывает через 0,5—0,6 с после разрыва тока, нормально проходящего по его обмотке через кон-

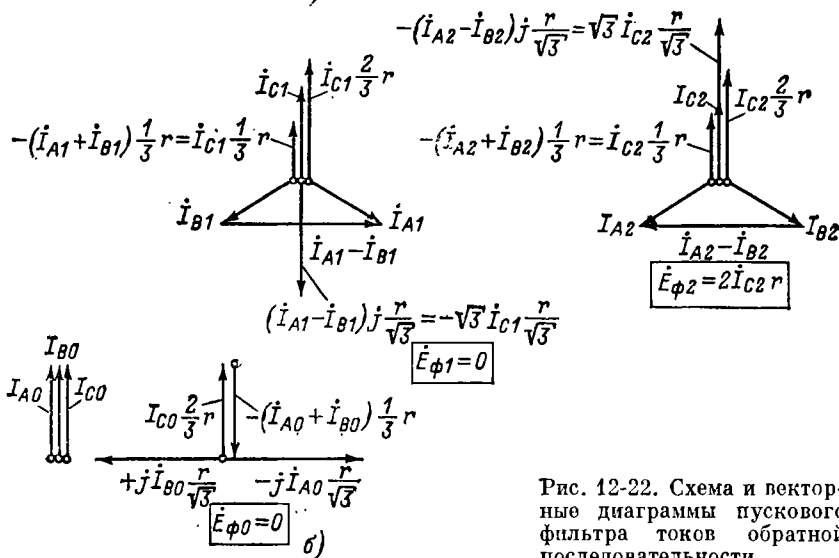
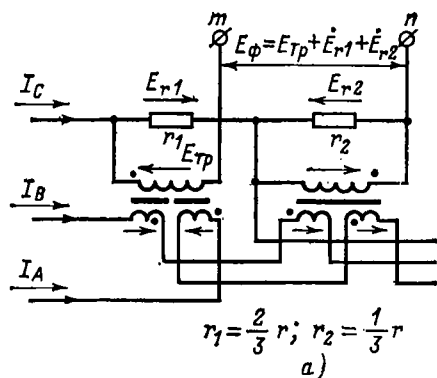


Рис. 12-22. Схема и векторные диаграммы пускового фильтра токов обратной последовательности.

такт $KP1$, а при к. з. — через контакты $ПП1$ или $PT1$. При срабатывании реле $KP2$ замыкает цепь обмотки реле $KP1$, восстанавливая в ней ток, под влиянием которого реле $KP1$ возвращается, прекращая пуск генератора.

Таким образом, пуск высокочастотного генератора осуществляется мгновенно при работе реле $ПП1$, а прекращение его действия происходит с замедлением через 0,5—0,6 с после возврата $ПП1$ и $PT1$.

При повреждении в зоне действия защиты прекращение работы передатчика в. ч. производится одновременно с подачей импульса на отключение выключателя от реле $KP6$.

Реле *KP6* исключает задержку отключения поврежденной линии при «каскадном» действии защиты. При отсутствии реле *KP6* передатчик на конце линии, отключившемся быстрее, продолжал бы работать, посылая из-за прекращения манипуляции сплошной импульс высокой частоты, в результате чего защита на противоположном (еще не отключившемся) конце линии была бы заблокирована до тех пор, пока не возвратится реле *KP1*.

Пусковое реле *PT1* предназначено для исключения одностороннего пуска высокочастотных постов при трехфазном к. з. вне зоны защиты, возможного под влиянием токов небаланса в фильтре, питающем реле *ПР1* и *ПР2*.

Реле *PT1*, срабатывая при трехфазных к. з. на обоих концах линии, обеспечивают двусторонний пуск передатчика.

Пуск цепи отключения защиты при несимметричных к. з. производится реле *ПР2*. Оно срабатывает при появлении несимметрии и своим нормально открытым контактом пускает реле *KP5*, а нормально закрытым — приводит в действие *KP4*, которое подводит плюс к контактам реле *PO*. При симметричных к. з. пуск защиты осуществляется совместным действием реле *ПР2* и *ПЗ*. В этом случае реле *ПР2* срабатывает кратковременно и разрывает цепь обмотки реле *KP4*, приводя его в действие. Одновременно срабатывает вспомогательное пусковое реле *ПЗ*, действующее в течение всего времени, пока длится трехфазное к. з. Цепь пуска защиты образуется через соединенные последовательно контакты реле *KP4* и *ПЗ*. Такая схема исключает пуск защиты при симметричных перегрузках, так как в этом случае не действуют реле *ПР2* и *KP4*, и кратковременных несимметрий, не сопровождающихся короткими замыканиями, поскольку при этом не работает реле *ПЗ*. Возврат реле *KP4*, срабатывающего при действии *ПР2*, осуществляется при помощи реле *KP3*, которое замыкает контакт через 0,25 с после срабатывания реле *KP4*, разрывающего ток в его обмотках.

Таким образом, цепь отключения при трехфазных к. з. замыкается только на 0,25 с, это замедление достаточно для действия защиты при повреждении линии. При несимметричных к. з. цепь обмотки *KP5* остается замкнутой контактами *ПР2*, пока продолжается к. з.

Кроме реле *KP4*, цепью пуска реле *KP3* управляют реле *ПЗ* и *KP5*. Контакты реле *KP5* введены в эту цепь для устранения пульсирующей работы реле *KP3* и *KP4* в случае несимметричного к. з., продолжительность которого превышает время действия реле *KP3*, а контакт реле *ПЗ* служит для блокировки защиты при нарушении цепи напряжения, питающей защиту.

При обрыве цепи напряжения пусковое реле *ПЗ* срабатывает, в результате чего пуск защиты становится возможным не только при к. з., но и при кратковременной несимметрии без к. з., что может вызвать неправильное действие защиты в случае неисправности в ч. канала.

Предусмотренная в схеме блокировка устраняет эту опасность. Срабатывая, реле *ПЗ* пускает реле *KP3*, которое с выдержкой времени шунтирует контакты пускового реле *ПР2*, не позволяя работать реле *KP4*, а следовательно, и защите при появлении несимметрии. Однако в результате такой блокировки защита не сможет действовать при трехфазных к. з. в зоне в случае повреждения ее цепей напряжения.

Этот недостаток частично устраняется при помощи реле *PT2*, включенного, так же как и реле *PT1*, на ток фазы. Реле *PT2* приходит в действие при трехфазных к. з., осуществляя пуск защиты помимо контактов *ПЗ* и *KP4*. Для отстройки от нагрузки уставка на реле *PT2* берется грубой, поэтому *PT2* работает только при к. з. с большим током.

Цепи переменного тока. Пусковые токовые реле *ПР1* и *ПР2* (рис. 12-21) выполняются при помощи поляризованных реле, питаемых токами I_2 и $3I_0$ через выпрямитель. Реле такой конструкции не имеют вибрации контактов и обладают незначительным потреблением. Последнее облегчает выполнение фильтра Φ_2 , от которого питаются реле.

С целью повышения чувствительности пускового органа при однофазных к. з. реле *ПР1* и *ПР2* питаются кроме тока I_2 током I_0 .

Фильтр Φ_2 состоит из активных сопротивлений r_1 и r_2 (рис. 12-22, а) и трансформаторного реактора, выполненного так же, как и в фильтре защиты РДЛ (см. § 10-7). Сопротивление r_1 питается током I_C , реактор — разностью токов $\dot{I}_A - \dot{I}_B$ и сопротивление r_2 — суммой токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B$. Напряжение $\dot{E}_\Phi$ на выходе фильтра (зажимы *mn*) равно:

$$\dot{E}_\Phi = \dot{E}_{r1} + \dot{E}_{rp} + \dot{E}_{r2}$$

или

$$\dot{E}_\Phi = \dot{I}_C r_1 - (\dot{I}_A - \dot{I}_B) jx_m - (\dot{I}_A + \dot{I}_B) r_2. \quad (12-4)$$

Сопротивления r_1 , x_m и r_2 подобраны так, чтобы E_Φ равнялось нулю при питании фильтра токами прямой и нулевой последовательностей, для этого принимается:

$$r_1 = \frac{2}{3} r; \quad r_2 = \frac{1}{3} r; \quad x_m = \frac{r}{\sqrt{3}}.$$

Векторные диаграммы фильтра Φ_2 при питании его токами I_1 , I_2 и I_0 и соответствующие E_Φ , полученные на основе (12-4), показаны на рис. 12-22, б.

Пусковые реле имеют две обмотки (рис. 12-21). Рабочие обмотки $ПР1_{\text{раб}}$ и $ПР2_{\text{раб}}$ действуют на замыкание контактов, а тормозные $ПР1_{\text{тор}}$ и $ПР2_{\text{тор}}$ служат для улучшения возврата реле.

Пусковой орган, выполненный по рассмотренной схеме, имеет следующие особенности:

а) При несимметричных к. з. защита пускается на все время, пока длится к. з., а при симметричных вводится только на время, достаточное для ее действия.

При кратковременных несимметриях, не сопровождающихся к. з., передатчики пускаются на 0,6 с, цепь же отключения остается разомкнутой контактами реле ПЗ, чем исключается неправильное действие защиты.

б) Пуск передатчика всегда продолжается дольше, чем время включения РО. Благодаря этому при внешних к. з. цепь отключения защиты размыкается до прекращения блокирующего тока высокой частоты, что повышает надежность защиты при внешних к. з.

в) Защита готова к повторному действию при несимметричных к. з. в любой момент, а при трехфазных — через 0,2 с после прекращения первого к. з., так как контакт реле КРЗ размыкается только через 0,2 с после восстановления тока в обмотке реле КРЗ.

г) Во время неполнофазного режима пусковые органы защиты могут прийти в действие, если токи I_2 и I_0 превысят уставку реле ПР1 и ПР2. Однако защита блокируется, как при внешнем к. з.

В случае возникновения в этом режиме к. з. на защищаемой линии реле РО сработает и защита действует на отключение.

Орган управления, или манипуляции (рис. 12-23 и 12-25), состоит из комбинированного фильтра Φ_m , трансформатора T_m и электронной лампы L_1 , непосредственно управляющей лампой L_2 задающего генератора приемопередатчика ПВЗК.

Фильтр Φ_m не пропускает токов нулевой последовательности. Напряжение на его выходных зажимах $\dot{U}_\Phi = \dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. При помощи трансформатора T_m оно подается на сетку лампы L_1 и управляет ее работой. При отрицательной полуволне напряжения U_Φ лампа L_1 заперта. При положительной полуволне лампа L_1 открывается и в ней появляется анодный ток I_{a1} . Проходя по сопротивлению r_1 , ток I_{a1} создает в нем падение напряжения $\dot{U}'_c = I_{a1} r_1$, которое подводится к защитной сетке C_3 лампы L_2 задающего генератора. Нормально на сетку C_3 этой лампы подано напряжение U''_c , создающее на сетке отрицательное смещение по отношению к катоду лампы. Напряжение U'_c запирает анодную цепь лампы L_2 , не давая колебаний в цепи самовозбуждения генератора, образующейся между катодом и экранной сеткой C_3 .

Напряжение U'_c противоположно по знаку напряжению U_c и немного превосходит его по величине. Поэтому при появлении U'_c на защитной сетке лампы L_2 возникает небольшой положительный по отношению к катоду потенциал $U_c = U'_c - U_c$. Лампа L_2 открывается, в ней появляется анодный ток I_{a2} , и передатчик посылает в ч. сигнал в линию. При появлении отрицательной полуволны напряжения U_ϕ в ч. сигнал прекращается.

Таким образом, передатчик работает, когда лампа L_1 открыта, и останавливается, когда она закрыта. В соответствии с этим импульсы токов высокой частоты появляются в течение положительной полуволны напряжения U_M и тока $I_1 + kI_2$ и исчезают во время отрицательной полуволны этого тока.

Для ограничения напряжения на сетке лампы L_1 при больших кратностях тока к. з. в схеме предусмотрены стабилизаторы (стабилитроны) CT (рис. 12-21 и 12-23).

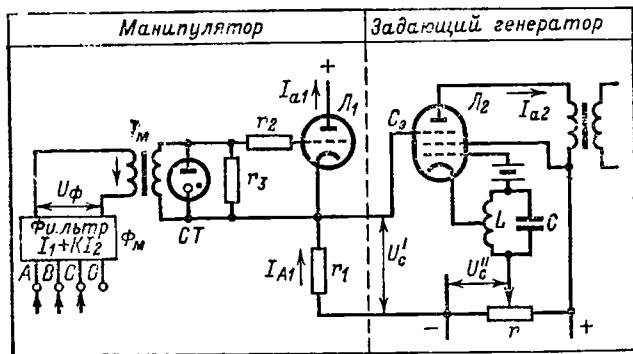


Рис. 12-23. Принципиальная схема органа манипуляции.

Схема фильтра Φ_M показана на рис. 12-24, а. Она состоит из трансформаторного реактора TP_M , питающегося разностью токов $I_B - I_C$ и активного сопротивления r_M , по левой части которого проходит ток I_A , а по правой — сумма токов $I_B + I_C$.

На вторичных зажимах трансреактора образуется э. д. с. $E_{TP} = -jx_m(I_B - I_C)$, отстающая на 90° от вектора $I_B - I_C$. Величина x_m может регулироваться ответвлениями вторичной обмотки и должна удовлетворять условию $x_m < r_m/\sqrt{3}$.

На зажимах левой части сопротивления создается напряжение $\dot{E}_{II} = I_A \frac{2}{3} r_m$, а на правой $\dot{E}_I = -(I_B + I_C) \frac{1}{3} r_m$.

Результирующее напряжение $\dot{U}_{\Phi_1}$ на выходе фильтра равно геометрической сумме векторов напряжений на зажимах его элементов, т. е.

$$\dot{U}_{\Phi} = \dot{E}_{TP} + \dot{E}_{II} + \dot{E}_I = \dot{E}_{TP} + I_A \frac{2}{3} r_m - (I_B + I_C) \frac{1}{3} r_m.$$

Векторные диаграммы напряжений на элементах фильтра и его выходе при прохождении токов прямой, обратной и нулевой последовательностей и соответствующие им U_ϕ показаны на рис. 12-24, б.

Из диаграммы следует, что токи нулевой последовательности не создают напряжения на выходе, в то время как U_{Φ_1} и U_{Φ_2} отличны от нуля, поэтому

результатирующее напряжение

$$\dot{U}_\Phi = \dot{U}_{\Phi 1} + \dot{U}_{\Phi 2} = \dot{I}_{A1}(r - \sqrt{3}x_m) + \dot{I}_{A2}(r + \sqrt{3}x_m) = k'(\dot{I}_{A1} + k\dot{I}_{A2}), \quad (12-5)$$

где

$$k = \frac{r + \sqrt{3}x_m}{r - \sqrt{3}x_m}.$$

Таким образом, U_{Φ} пропорционально $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$. Конструкцией предусматриваются три значения k : 4, 6 и 8. При $k = 8$ передатчик начинает работать при токе на входе фильтра $\dot{I}_1 = 2$ А или $I_2 = 0,25$ А.

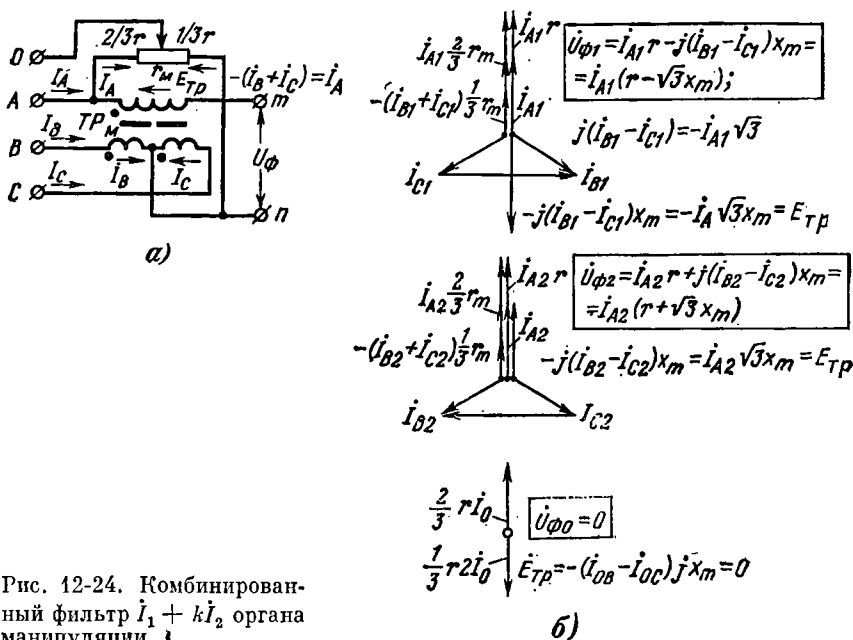


Рис. 12-24. Комбинированный фильтр $I_1 + kI_2$ органа манипуляции.

Орган сравнения фаз. Как указывалось, реле РО (обозначенное на рис. 12-25 *РР4*) питается анодным током приемника и реагирует на разность фаз токов по концам линии в зависимости от характера в. ч. сигнала. В защите ДФЗ-2 в качестве реле *РР4* применено поляризованное реле, включаемое по схеме, показанной на рис. 12-25, *а*.

Анодный ток приемника I_{a1} при к. з. в зоне имеет прерывистый характер, изображенный на рис. 12-25, б. Если бы реле $PP4$ питалось непосредственно анодным током, то его контакты замыкались бы ненадежно. Поэтому питание реле $PP4$ осуществляется по особой схеме, преобразующей прерывистый анодный ток приемника в постоянный. Схема (рис. 12-25, а) состоит из трансформатора T , выпрямителя B и конденсаторов C_3 и C_4 . Для уяснения процесса преобразования представим, что кривая анодного тока разложена на гармоники с частотами, кратными 50 Гц. Токи высших гармоник ($f > 50$ Гц) замыкаются главным образом через конденсатор C_3 , а токи основной частоты ($f = 50$ Гц) — через индуктивное сопротивление первичной обмотки трансформатора T , имеющей для токов основной гармоники меньшее сопротивление, чем конденсатор C_3 . Вторичный ток трансформатора T I_{a1} выпрямляется выпрямителем B , сглаживается конденсатором C_4 и питает обмотку реле $PP4$.

в том случае, если контакты промежуточного реле $KP5$ замкнуты. Последнее срабатывает только при действии пусковых реле защиты при к. з. (см. рис. 12-20).

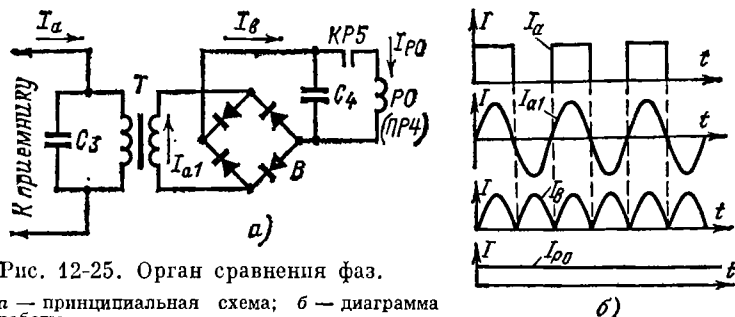


Рис. 12-25. Орган сравнения фаз.

а — принципиальная схема; б — диаграмма работы.

Величина тока в реле зависит от продолжительности импульсов высокой частоты. С уменьшением интервалов между импульсами тока высокой частоты уменьшается ток I_{PO} , поступающий в реле $ПР4$ (PO). При токе $I_{PO} \geq I_{c.p}$ реле $ПР4$ приходит в действие. Так как продолжительность перерыва между импульсами высокой частоты зависит от сдвига фаз ψ между токами I_m и I_n по концам линии, то, следовательно, величина тока I_{PO} зависит от угла ψ . Эта зависимость $I_{PO} = f(\psi)$, называемая фазной характеристикой, изображена на рис. 12-26. Угол блокировки защиты β регулируется уставкой $ПР4$ в пределах $\pm 45^\circ - 60^\circ$.

Действие защиты при различных режимах. При внешнем несимметричном к. з. на обоих концах линии срабатывают реле $ПР1$ и $ПР2$, приводящие в действие в. ч. посты и разрешающие работать реле PO (рис. 12-20). Приемники постов принимают непрерывный ток высокой частоты. Поэтому в реле PO отсутствует ток и его контакты в цепи отключения остаются разомкнутыми.

Внешнее симметричное к. з. На обоих концах линии срабатывают пусковые реле $ПЗ$, $РТ2$ и одновременно реле $ПР1$ и $ПР2$. Через контакты $KP4$, $РТ2$ и $ПР2$ подготавливается цепь отключения, но защита не действует, так как токи высокой частоты генерируются непрерывно и в реле PO отсутствует ток. Цепь отключения разрывается контактом реле $KP4$ через 0,2 с, после чего защита готова к повторному действию. Пуск в. ч. постов

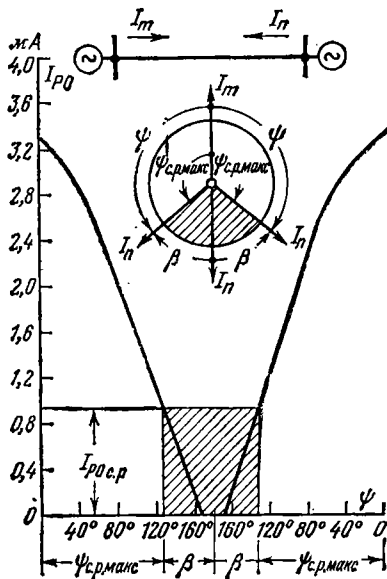


Рис. 12-26. Фазные характеристики дифференциально-фазной высокочастотной защиты. Заштрихована зона блокировки.

продолжается 0,5—0,6 с.

Короткое замыкание в зоне защиты. При двустороннем питании токи к. з. проходят к месту повреждения с обоих концов линии. Под влиянием этих токов срабатывают пусковые органы, которые готовят цепь отключения и пускают генераторы в. ч.

Токи $I_1 + kI_2$ на выходе фильтров манипуляции совпадают по фазе. В линии возникает прерывистый ток в. ч. обуславливающий появление тока в реле *РО* после замыкания цепи его обмотки контактами реле *КР5*. Реле *РО* срабатывают на обоих концах линии и посылают импульсы на отключение выключателей.

При одностороннем питании линии ток повреждения проходит только с одного конца линии, связанного с источником питания. Под действием этого тока защита на питающем конце надежно пускается при всех к. з., но поведение защиты будет зависеть от приемного конца, где проходит только ток нагрузки. В случае несимметричного к. з. под влиянием напряжения обратной последовательности, возникающего в месте к. з., по обоим концам линии будет проходить ток I_2 , замыкающийся на приемном конце через нагрузку. Под действием этих токов в линии появится прерывистый сигнал высокой частоты и защита сработает на отключение.

В случае симметричного трехфазного к. з. ток несимметрии появится только в первый момент. Пусковые реле *ПР1* сработают кратковременно и пустят передатчики на обоих концах линии на время, определяемое замедлением реле *КР2* и *КР3*. Передатчик на питающем конце, управляемый током к. з., будет посылать прерывистый ток высокой частоты. Передатчик же на приемном конце будет работать непрерывно, посылая сплошной сигнал, так как на этом конце линии напряжение будет равно нулю, вследствие чего ток в линии и манипуляция генераторной лампой отсутствуют. В результате этого защита откажет в действии. Короткое замыкание в этом случае должно отключаться резервной защитой линии.

Разработана и готовится к выпуску дифференциально-фазная защита типа ДФЗ-201, она является усовершенствованной модификацией защиты ДФЗ-2.

12-8. ВЫБОР УСТАВОК ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗНОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЗАЩИТЫ

Уставки на пусковых реле. Выбор уставок ведется на основе следующих общих положений:

1. Для обеспечения селективности при внешних к. з. (см. § 12-6), пусковые реле, управляющие цепью отключения, должны иметь более грубую уставку, чем (пусковые) реле, управляющие пуском в. ч. постов на противоположном конце линии. Чувствительность пусковых реле в цепи отключения принимается с обеих сторон линии одинаковой, аналогично выбираются равными уставки на реле, пускающих в. ч. пост.

2. Во избежание действия защиты в режимах нагрузки пусковые реле, реагирующие на нее (*РТ1*, *РТ2* и *ПЗ*) (рис. 12-20), отстраиваются от нагрузки с учетом $k_{\text{в.о.з.}}$.

3. Пусковые реле, включенные через фильтры симметричных составляющих (реле *ПР1* и *ПР2*), отстраиваются от токов небаланса при внешних трехфазных к. з.

Ток срабатывания *РТ1* (пускающего в. ч. пост) $I_{\text{с.з.РТ1}}$ отстраивается от нагрузки и определяется по выражению

$$I_{\text{с.з.РТ1}} = \frac{k_n I_{\text{н.макс}}}{k_{\text{в.о.з.}}}, \quad (12-6)$$

где $I_{\text{н.макс}}$ принимается равным максимальной нагрузке в нормальном режиме; при этом допускается, что в аварийных режимах реле *РТ1* может сработать, поскольку это не может вызвать ложного действия защиты.

Ток срабатывания $PT2$, осуществляющего пуск цепи отключения ($I_{с.з PT2}$), выбирается больше $I_{с.з PT1}$ на противоположном конце линии и отстраивается от $I_{н.макс}$ в аварийном режиме.

По первому условию

$$I_{с.з PT2} = (1,5 \div 2) I_{с.з PT1}. \quad (12-7)$$

По второму условию $I_{с.з PT2}$ определяется по выражению (12-6), в котором $I_{н.макс}$ принимается максимально возможным в аварийном режиме.

За окончательное значение $I_{с.з PT2}$ принимается большее из двух значений.

Ток срабатывания $PT1$ (пускающего в ч. пост) отстраивается от $I_{нб}$ при внешних трехфазных к. з., когда $I_K^{(3)} = I_{с.з PT1}$. При указанном значении $I_K^{(3)}$ будут работать реле $PT1$, обеспечивая двусторонний пуск передатчиков, поэтому ложное действие реле $PT1$ от небаланса в этих условиях не опасно:

$$I_{с.з PT1} = k_n I_{нб}. \quad (12-7a)$$

Ток срабатывания $PP2$ (управляющего цепью отключения) выбирается из условия

$$I_{с.з PP2} = 2 I_{с.з PP1}.$$

Чувствительность пуска цепей отключения защиты проверяется по минимальному значению I_2 при двухфазном и однофазном к. з. на противоположном конце линии. Коэффициент

$$k_4 = \frac{I_{2\min}}{I_{с.з PP2}} \geq 2.$$

В случае недостаточной чувствительности при однофазных к. з. вводится элемент, реагирующий на I_0 .

Величина тока в реле $PP2$ при минимальном значении расчетного тока $3I_0$ при однофазном к. з. и выбранной уставке на элементах I_2 и I_0 находится по кривым, приводимым в технических данных на ДФЗ-2.

Сопротивление срабатывания ПЗ находится из условия надежного охвата защищаемой линии и отстройки от токов нагрузки.

По первому условию $z_{с.з} = (1,5 \div 2) z_L$ при $\varphi_R = \varphi_K$. По второму условию

$$z_{с.з} = \frac{k_n z_{раб.мин}}{k_{воз}} \text{ при } \varphi_R = \varphi_n.$$

Ток срабатывания реле РО (РП4). От величины этого тока зависит величина угла блокировки β , что видно из рис. 12-26. Угол β , а следовательно, и ток срабатывания РО, должны быть такими, чтобы защита не действовала при внешних к. з. и надежно работала при повреждении в зоне, при имеющих место искажения фаз.

При внешних к. з. в результате фазовых погрешностей сдвиг фаз ψ между токами $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ отличается от 180° на угол β . Это искажение фаз вызывается:

- 1) угловыми погрешностями трансформаторов тока $\Delta\varphi_{т.т}$;
- 2) появлением сдвига фаз первичных токов по концам защищаемой линии $\Delta\varphi_c$ вследствие наложения на ток сквозного к. з. емкостных токов линии, эта погрешность учитывается только на длинных линиях 330 кВ и выше (см. § 14-1, б);

- 3) угловыми погрешностями органа манипуляции комплектов защит $\Delta\varphi_m$;

- 4) конечной скоростью распространения токов в ч. с одного конца линии на другой. Время прохождения в ч. сигнала с одного

конца линии на другой $\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{l}{3 \cdot 10^5}$ с, где l — длина линии, км; v — скорость распространения электромагнитных волн (в. ч. сигнала), приближенно принимается равной скорости света $3 \cdot 10^5$ км/с.

За время Δt фаза первичного тока, например на конце m , изменяется на $\Delta \varphi$ градусов. Продолжительность одного периода первичного тока (с частотой $f = 50$ Гц) $T = 1/50 = 0,02$ с. С учетом этого

$$\Delta \varphi = \frac{360^\circ}{0,02 \text{ с}} \Delta t = 18 \cdot 10^2 \Delta t.$$

Подставив в это выражение значение Δt , получим, что за время передачи импульса в. ч. на расстоянии l фаза первичного тока изменится на $\Delta \varphi = 18 \cdot 10^2 \frac{l}{3 \cdot 10^5} = 0,06 \cdot l$ град. На линии с $l = 100$ км фаза первичного тока искажается на угол $\Delta \varphi = 6^\circ$. С учетом сказанного полная фазовая погрешность, или отклонение угла сдвига фаз ψ от 180° , при внешних к. з. равна сумме перечисленных выше погрешностей:

$$\beta = \Delta \varphi_{\text{т.т}} + \Delta \varphi_{\text{с}} + \Delta \varphi_{\text{м}} + 0,06l. \quad (12-8)$$

Расчет и опыт эксплуатации показывает, что суммарное значение погрешностей достигает $40-55^\circ$ в зависимости от длины и напряжения линии. С учетом необходимого запаса угол блоки-

ровки β принимается равным $45-66^\circ$. Соответствующий этому предельно допустимый сдвиг фаз между токами $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ угол $\psi = 180^\circ - \beta$. Такое отличие сдвига фаз ψ от 180° приводит к нарушению непрерывности в. ч. сигнала, как показано на рис. 12-27, и появлению тока I_{PO} в реле PO (реле $ПР4$ в ДФЗ-2), под действием этого тока защита может сработать неправильно. Для исключения неправильной работы защиты при внешних к. з. необходимо выполнить условие

$$I_{PO \text{ с.р}} > I_{PO \text{ макс}} \text{ и } \psi \geq 180 - \beta, \quad (12-8a)$$

где $I_{PO \text{ макс}}$ — максимальный ток в реле PO , а ψ — максимальный допустимый угол сдвига фаз между $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ при внешних к. з.

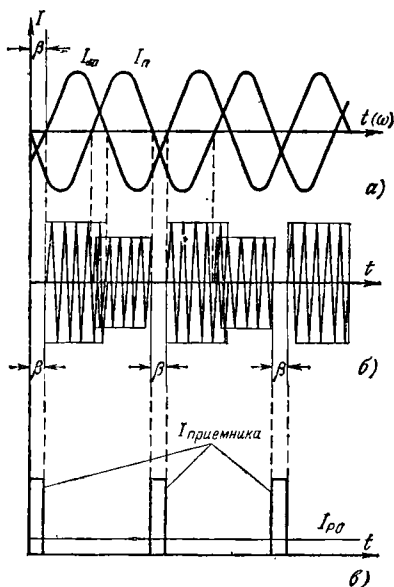


Рис. 12-27. Нарушение непрерывности высокочастотного сигнала из-за искажения фаз токов.

а — первичные токи по концам линии; б — высокочастотные импульсы в линии; в — ток в реле PO .

Задавшись значением β , ток срабатывания, удовлетворяющий (12-8а), находим графически по кривой $I_{PO} = f(\psi)$ (рис. 12-26). Найденное значение $I_{с.р.р.о}$ и соответствующее ему значение β должны обеспечивать надежную работу при к. з. в зоне, для чего необходимо, чтобы сдвиг фаз между $\dot{I}_m$ и $\dot{I}_n$ угол $\psi \leq 180 - \beta$.

В защите ДФЗ-2 предусмотрено три уставки срабатывания на реле ПР4, которым соответствуют три значения (уставки) угла блокировки β : $\pm 45^\circ$; $\pm 52^\circ$ и $\pm 60^\circ$. Поэтому практически выбор $I_{PO.c.p.}$ сводится к выбору β с учетом расчетных значений угловых погрешностей.

Коэффициент k фильтра манипуляции в выражении $\dot{U}_M = k' (\dot{I}_{1A} + kI_{2A})$ определяет величину и фазу напряжения на выходе комбинированного фильтра манипуляции. Коэффициент k должен быть таким, чтобы при несимметричных к. з. слагаемое kI_2 существенно превосходило I_1 . При выполнении этого условия напряжения на выходе фильтра будут определяться током I_2 , фазы которых при повреждении в зоне совпадают на обоих концах линии (§ 12-7). Исходя из этого условием для выбора k является неравенство $kI_2 \geq k_{зап}I_1$; коэффициент запаса $k_{зап}$ принимается равным 1,5. Отсюда

$$k = 1,5 I_1/I_2. \quad (12-9)$$

Анализ показывает, что отношение I_1/I_2 имеет наибольшее значение при двухфазных к. з. на землю на противоположном конце линии. Наиболее неблагоприятным (при схеме питания фильтра, показанной на рис. 12-24) является замыкание на землю фаз B и C . В этом случае токи прямой и обратной последовательностей фазы A , через которые выражается U_ϕ , сдвинуты на 180° (рис. 12-28).

По расчетному значению I_1/I_2 согласно (12-9) находят минимальную величину коэффициента k . Рекомендуются значения k порядка 6—8. По условию селективности при внешних замыканиях коэффициенты k должны приниматься одинаковыми на обоих концах линии.

12-9. ОЦЕНКА ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ЗАЩИТ

Принцип действия в. ч. защит, направленных и дифференциальнофазных, надежен и прост. В настоящее время эти защиты являются единственными защитами, обеспечивающими мгновен-

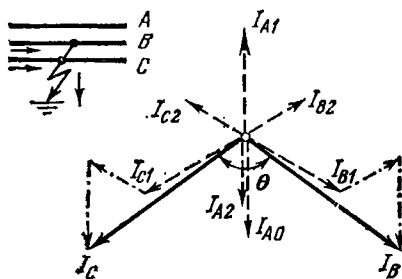


Рис. 12-28. Векторная диаграмма при двухфазном к. з. на землю.

ное и двустороннее отключение к. з. на линиях большой протяженности. Общим недостатком всех в. ч. защит являются более высокая стоимость и сложность по сравнению с другими видами защит.

Высокочастотные защиты получили широкое распространение как основные защиты в сетях 110—750 кВ. Они позволяют обеспечить быстрое и селективное отключение к. з. при любой конфигурации сети и являются наиболее чувствительными. Учитывая, что в. ч. защиты относятся к числу сложных, их следует применять только в тех случаях, когда более простые виды защит оказываются непригодными.

В Советском Союзе наиболее широкое распространение получила дифференциально-фазная защита. Дифференциально-фазная в. ч. защита имеет существенное преимущество: она не реагирует на качания. Это преимущество приобретает важное значение с внедрением быстродействующих и несинхронных АПВ, сочетание которых с защитами, реагирующими на качания, вызывает затруднения. Помимо того, дифференциально фазная защита, применяемая в СССР, отличается простой схемой и высокой чувствительностью пускового органа. Для линий 750 кВ разработана направленная в. ч. защита НДФЗ-750, которая в цикле ОАПВ превращается в дифференциально-фазную.

ГЛАВА ТРИНАДЦАТАЯ

ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ НЕПРАВИЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

13-1. ХАРАКТЕР ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ И СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ЗАЖИМАХ РЕЛЕ ПРИ КАЧАНИЯХ

Явления, называемые качаниями, возникают при нарушении синхронной работы генераторов электрической системы. Качания сопровождаются возрастанием тока и снижением напряжения в сети, на эти изменения тока и напряжения защиты реагируют так же, как и на симметричное к. з.

Представление о характере изменения тока и напряжения при качаниях дает рассмотрение простейшей электрической системы (рис. 13-1, а), состоящей из двух генераторов: G_A и G_B , связанных между собой линией электропередачи. В нормальных условиях угловые скорости ω_A и ω_B , с которыми вращаются векторы э. д. с. $\vec{E}_A$ и $\vec{E}_B$, одинаковы. При нарушении синхронизма частота вращения роторов генераторов G_A и G_B , а также частота вращения векторов их э. д. с. становятся различными.

Если предположить, что частота вращения ротора генератора G_A стала большей, чем генератора G_B , то и электрическая скорость $\omega_A > \omega_B$.

В результате этого вектор $\vec{E}_A$ (рис. 13-1, б) будет вращаться относительно вектора $\vec{E}_B$ с угловой скоростью скольжения

$\omega_s = \omega_A - \omega_B$, а разность э. д. с. $\Delta \dot{E} = \dot{E}_A - \dot{E}_B$ будет менять свою величину в зависимости от значения угла δ .

Полагая, что по величине $|\dot{E}_A| = |\dot{E}_B| = \dot{E}$, из векторной диаграммы, изображенной на рис. 13-1, б, находим:

$$\Delta E = 2E \sin \frac{\delta}{2}, \quad (13-1)$$

где угол δ — функция времени и скольжения ω_s .

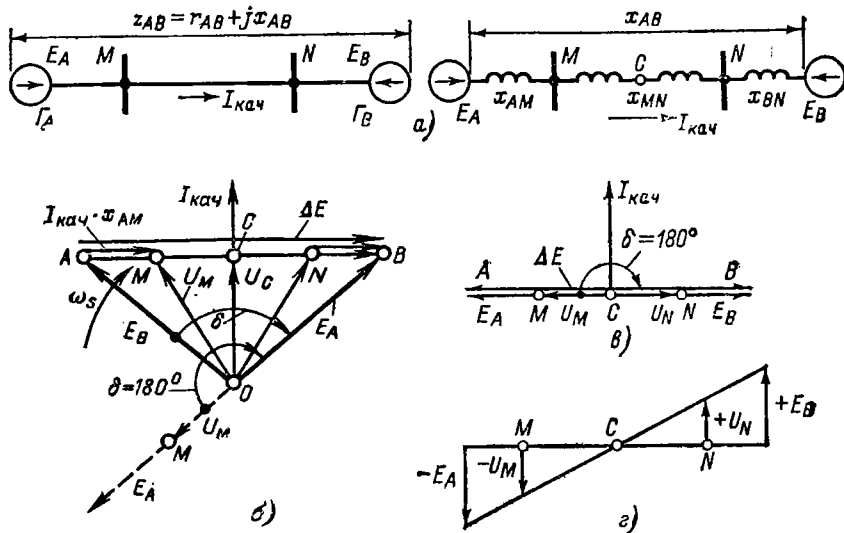


Рис. 13-1. Векторные диаграммы токов и напряжений при качаниях.

а — простейшая электрическая система и схема ее замещения; б и в — векторные диаграммы при различных значениях угла δ ; г — распределение напряжения в системе при $\delta = 180^\circ$.

При $\omega_s = \text{пост.}$ угол $\delta = \omega_s t$; с учетом этого

$$\Delta \dot{E} = 2E \sin \frac{\omega_s}{2} t. \quad (13-2)$$

Полученное выражение показывает, что действующее значение ΔE меняется по закону синуса и достигает максимальной величины при $\delta = 180^\circ$ (рис. 13-1, в), а минимальный — при $\delta = 0$.

Ток качания. Под влиянием э. д. с. $\Delta \dot{E}$ в сети, соединяющей генераторы G_A и G_B , появляется ток качания:

$$I_{кач} = \frac{\Delta \dot{E}}{z_{AB}}. \quad (13-2a)$$

Сопротивление $z_{AB} = \sqrt{x_{AB}^2 + r_{AB}^2}$ является эквивалентным сопротивлением цепи, по которой замыкается ток $I_{кач}$.

Пренебрегая активным сопротивлением r_{AB} , можно считать, что ток $I_{\text{кач}}$ отстает от э. д. с. $\Delta \dot{E}$ на 90° .

С учетом (13-1), (13-2) и (13-2а)

$$I_{\text{кач}} = \frac{2E}{x_{AB}} \sin \frac{\delta}{2}. \quad (13-3)$$

Из (13-3) следует, что действующее значение тока качания $I_{\text{кач}}$ меняется с такой же периодичностью, как и $\Delta \dot{E}$. Характер изменения $I_{\text{кач}}$ по времени показан на рис. 13-2, а. Максимальное значение $I_{\text{кач}}$ достигается при $\delta = 180^\circ$, т. е. когда э. д. с. генераторов G_A и G_B противоположны по фазе,

$$I_{\text{кач. макс}} = \frac{2E}{x_{AB}}. \quad (13-3a)$$

При $\delta = 0$, когда э. д. с. генераторов совпадают по фазе, $I_{\text{кач}}$ снижается до нуля.

Однако в действительности при $\delta = 0$ ток $I_{\text{кач}}$ будет отличаться от нуля, так как обычно $E_A \neq E_B$. Это обстоятельство необходимо учитывать при анализе поведения защиты при качаниях.

Напряж е н и е в какой-либо точке M сети при качаниях (рис. 13-1, а) равно: $\dot{U}_M = \dot{E}_A - I_{\text{кач}} x_{AM}$; здесь $I_{\text{кач}} x_{AM}$ — падение напряжения на участке AM .

Вектор падения напряжения $I_{\text{кач}} x_{AM}$ совпадает по фазе с вектором $\Delta \dot{E}$ (вектор AB на рис. 13-1, б) и составляет его часть. Следовательно, на диаграмме на рис. 13-1, в конец вектора напряжения U_M будет лежать на отрезке AB . В каждый момент времени или, иначе говоря, при каждом значении угла δ действующее напряжение в различных точках сети будет различным. Наименьшее значение оно имеет в точке C , в которой вектор напряжения U_C перпендикулярен вектору $\Delta \dot{E}$. Эта точка называется электрическим центром системы или электрическим центром качаний. Она находится в середине сопротивления z_{AB} * при условии, что э. д. с. $|\dot{E}_A| = |\dot{E}_B|$, а сопротивление на всех участках сети однородно. По мере удаления (вправо и влево) от электрического центра системы (точки C) напряжение U_M нарастает.

С изменением угла δ изменяются и напряжения во всех точках сети. При $\delta = 0$ напряжение во всех точках сети одинаково и имеет максимальное значение $U_{\text{макс}} = E$. С увеличением δ напряжение в сети снижается, имея наименьшую величину в электрическом центре (в точке C). При $\delta = 180^\circ$ напряжение в электрическом центре системы падает до нуля, в остальных же точках системы оно отлично от нуля и равно $U_M = I_{\text{кач}} z_{CM}$ (рис. 13-1, г).

* При вычислении z_{AB} для определения электрического центра, а также токов и напряжения при качаниях сопротивления генераторов замещаются сверхпереходным реактивным сопротивлением x_d'' .

На рис. 13-2, б показан характер изменения напряжения в точках М и С сети в функции угла δ .

Кривые изменения сопротивления для тех же точек сети

$$z_M = \frac{U_M}{I_{\text{кач}}} \text{ и } z_C = \frac{U_C}{I_{\text{кач}}}$$

приведены на рис. 13-2, в.

13-2. ПОВЕДЕНИЕ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

Поведение пусковых реле тока, напряжения и сопротивления. Характер изменения $I_{\text{кач}}$, $U_{\text{кач}}$ и $z_{\text{кач}}$ таков, что защиты, реагирующие на указанные величины, могут приходить в действие. Действительно, сопоставляя уставки срабатывания соответствующих защит с кривыми изменения $I_{\text{кач}}$, $U_{\text{кач}}$, $z_{\text{кач}}$ (рис. 13-2, а, б и в), легко убедиться в том, что реагирующие на ток, напряжение и сопротивление реле приходят в действие при качаниях.

Особенно неблагоприятные условия для защит, реагирующих на U и z , возникают в электрическом центре качаний и в близлежащих от него точках из-за резкого понижения напряжения на этом участке сети.

Период качаний $T_{\text{кач}}$ зависит от степени расхождения скоростей синхронных генераторов. Чем больше разница между ω_A и ω_B , тем меньше период качаний $T_{\text{кач}}$.

Как видно из кривых на рис. 13-2, защиты действуют только в течение части периода качаний T' . Так, например, токовые реле срабатывают при $I_{\text{кач}} \geq I_{\text{с.р}}$ и возвращаются при снижении $I_{\text{кач}}$ до величины $I_{\text{воз}}$. Аналогично ведут себя реле напряжения и реле сопротивления.

Защиты, действующие мгновенно, могут сработать при любом значении периода качаний при условии, что у токовых реле $I_{\text{с.р}} < I_{\text{кач. макс}}$, а у реле напряжения и сопротивления $U_{\text{с.р}}$ и $z_{\text{с.р}}$ соответственно больше, чем $U_{\text{кач. мин}}$ и $z_{\text{кач. мин}}$. Защиты, имеющие выдержку времени, действуют при качаниях только при условии, что период качаний превышает время работы защиты. Однако защиты с выдержкой времени могут подействовать и при очень малых периодах качаний, если время возврата реле $t_{\text{воз}}$ оказы-

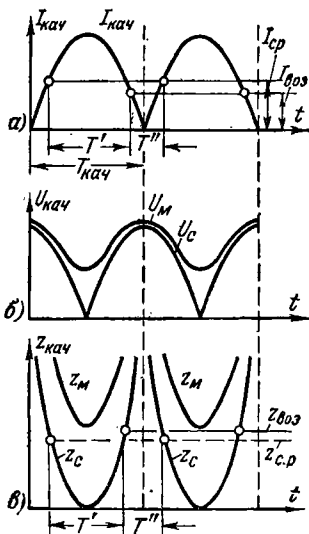


Рис. 13-2. Характер изменения электрических величин на зажимах реле при качаниях.

а — тока; б — напряжения; в — сопротивления.

вается больше времени T'' (рис. 13-2, а). В этом случае реле не успевает вернуться за время спада качаний и, удерживаясь в сработанном состоянии, может подействовать через несколько циклов качаний, когда истечет время его действия. При качаниях в системе продолжительность периода качаний не остается постоянной. В связи с появившимся возмущением скорость вращения ротора машины начинает изменяться; например; увеличиваясь, она достигает некоторого предела, после чего начинает убывать и затем снова повышается, колеблясь вокруг значения синхронной скорости. Соответственно меняется и период качаний.

Различают два случая качаний: синхронные и асинхронные. В первом случае появившееся нарушение синхронной работы не сопровождается нарушением устойчивости (асинхронным ходом) генераторов. При этом разница электрических скоростей генераторов $\omega_s = \omega_A - \omega_B$, быстро уменьшается, приближаясь к нулю, а угол δ в процессе качаний не достигает 180° .

Во втором случае происходит нарушение устойчивой работы генераторов. Роторы вышедших из синхронизма машин и их э. д. с. проворачиваются относительно друг друга, а угол δ превосходит 180° . Для таких качаний характерны нарастание скольжения ω , и уменьшение периода $T_{\text{нач}}$. Напряжение и ток достигают при этом своих предельных значений. Исследования, проведенные за последнее время, показывают, что при определенных условиях и в этом случае генераторы могут втянуться в синхронизм. Однако этот процесс имеет достаточно длительный характер. Происходящее при этом колебание напряжения отражается на работе потребителей. Поэтому в этих условиях необходимо принимать меры, вручную и автоматически способствующие быстрому восстановлению синхронизма. *Опыт показывает, что защиты с выдержкой времени 1,5—2 с, как правило, не успевают сработать во время качаний.* При асинхронных качаниях их период уменьшается до очень малых значений, порядка 0,3—0,2 с. В этих случаях неправильное действие защит с выдержкой времени возможно только при медленном возврате пусковых реле или реле времени. Однако первые периоды асинхронных качаний, а также последние периоды при затухании качаний во время втягивания в синхронизм (ресинхронизации) могут иметь продолжительность, достаточную для срабатывания защиты с большой выдержкой времени. Это особенно вероятно при медленном процессе нарушения статической устойчивости и подтверждается опытом эксплуатации (были случаи работы защиты с $t = 3 \div 4$ с).

Поведение направленной высокочастотной защиты. Неправильно работают при качаниях и органы направления мощности в. ч. защит. Из диаграммы на рис. 13-1, в и г видно, что при изменении угла δ от 0 до 360° угол сдвига между токами в линии и напряжением в данной точке сети (например, M) будет принимать ряд значений от 0 до 180° и от 180 до 360° .

При $\delta = 180^\circ$ напряжения по обеим сторонам точки C электрического центра качаний находятся в противофазе (рис. 13-1, $в$ и $г$).

В результате этого мощность по концам линии MN , на которой расположен электрический центр качаний, будет иметь положительный знак и, следовательно, направленная высокочастотная защита, основанная на сравнении мощностей по концам линии, будет действовать так же, как и при к. з. в ее зоне, т. е. на отключение линии.

Отказ защиты при качаниях. Во время качаний возможна не только неправильная работа защиты, но и ее отказ в действии при к. з. Типичная схема, при которой возможен подобный случай, изображена на рис. 13-3, $а$.

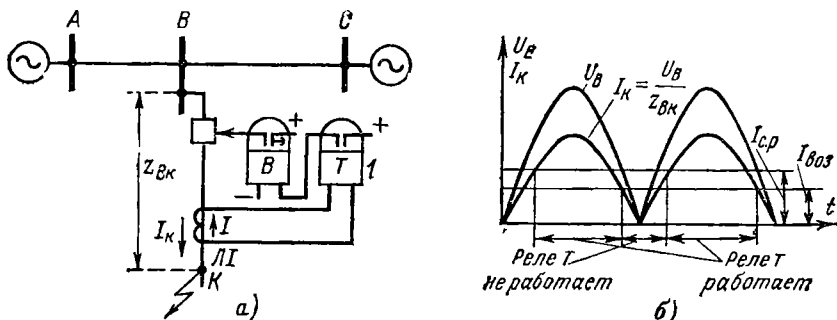


Рис. 13-3. Отказ в действии защиты при к. з., сопровождаемом качаниями.

Если при к. з. на линии $ЛЛ$ нарушится синхронная работа электростанций A и C и возникнут качания, то напряжение U_B на подстанции B , от которой питается поврежденная линия, будет пульсировать с частотой, определяемой периодом качаний $T_{кач}$. Вместе с напряжением U_B будет колебаться и ток к. з. в $ЛЛ$ $I_K = U_B / z_{BK}$ (рис. 13-3, б). Если период качаний $T_{кач}$ окажется меньше выдержки времени защиты I , а минимальный ток $I_{K.мин} < I_{воз}$ защиты, то последняя не сможет подействовать на отключение. Чем ближе к электрическому центру качаний расположена подстанция B , тем больше вероятность отказа защиты.

Для предотвращения подобного отказа защиты на линиях, где возможно резкое уменьшение тока к. з. при качаниях, следует применять мгновенно действующую защиту.

13-3. МЕРЫ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ НЕПРАВИЛЬНЫХ ДЕЙСТВИЙ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ

Как следует из сказанного, при качаниях возникают условия для неправильных хаотических действий защиты, которые приводят к тяжелым авариям. Весьма важным требованием, предъявляемым к защите, является недействие ее при качаниях. Некото-

рые защиты, например дифференциальные, не реагируют на качания по своему принципу действия. Большинство же защит воспринимает качания как симметричное к. з., и поэтому требуются специальные меры, предотвращающие возможность их ложной работы. В качестве таких мер используются три способа.

Первый из них, наиболее простой, состоит в том, что параметры срабатывания пусковых реле защиты выбираются с таким расчетом, чтобы они не действовали при качаниях. С этой целью у токовых защит ток срабатывания выбирается больше максимального тока качания $I_{с.з} > I_{кач}$, а у дистанционных защит $z_{с.з}$ должно быть меньше минимальной величины сопротивления, возможной в данной точке сети при качаниях. Последнее условие можно выполнить, если электрический центр лежит за пределами зоны действия защиты. Практически этот путь предотвращения ложной работы защиты при качаниях применим только для токовых отсечек и иногда для первых зон дистанционных защит. В качестве второго способа служит отстройка от качаний при помощи выдержки времени порядка 1—2 с. Это мероприятие применимо в тех случаях, когда указанное замедление защит допустимо по условиям устойчивости и бесперебойного питания потребителей. И, наконец, третьим способом предотвращения ложной работы защит при качаниях является применение блокировок, выводящих защиту из действия при возникновении качаний.

Блокирующие устройства должны удовлетворять двум основным требованиям: 1) выводить защиту из действия при качаниях, возникших как в нормальном режиме, так и при к. з., и 2) не должны препятствовать работе защиты, если во время качаний на защищаемом ею участке возникает к. з.

В СССР разработаны два типа блокирующих устройств: одно отличает к. з. от качаний по появлению несимметрии тока или напряжения сети, а второе — по скорости изменения тока, напряжения или сопротивления в месте установки защиты.

13-4. УСТРОЙСТВО БЛОКИРОВКИ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ, РЕАГИРУЮЩЕЕ НА ТОК ИЛИ НАПРЯЖЕНИЕ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Устройство, изображенное на рис. 13-4, отличает качания от к. з. по появлению тока или напряжения обратной последовательности в сети. Для этой цели используется реле H_2 , включенное через фильтр тока или напряжения обратной последовательности. При качаниях токи и напряжения симметричны и не содержат составляющих обратной последовательности. Следовательно, в этом случае реле обратной последовательности не будет действовать.

При двухфазных и однофазных к. з. токи и напряжения несимметричны и содержат значительную составляющую обратной последовательности, под действием которых реле H_2 приходит в действие.

При трехфазных к. з. токи и напряжения симметричны, и поэтому U_2 и $I_2 = 0$. Однако исследования и практика эксплуатации показывают, что в начальный момент трехфазного к. з. из-за неодновременного замыкания трех фаз появляется ток и напряжение обратной последовательности.

Трехфазные повреждения обычно начинаются с замыкания одной или двух фаз и затем переходят в трехфазное. Такое положение имеет место даже при включении на трехфазную закоротку

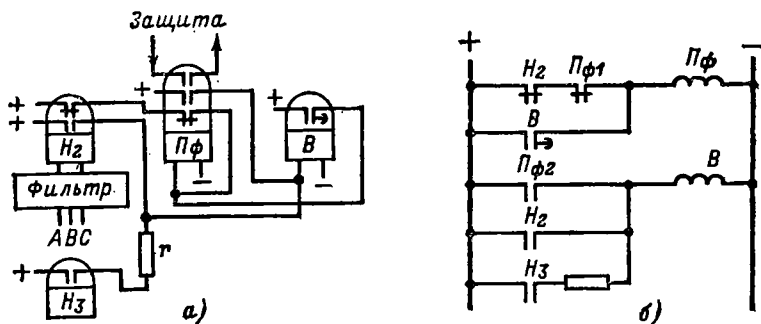


Рис. 13-4. Схема устройства блокировки защиты при качаниях с быстрым возвратом. Контакты реле показаны в состоянии готовности к действию.

вследствие разновременности замыкания контактов выключателя. Кроме того, исследования показывают, что и при одновременном замыкании трех фаз кратковременно появляется ток в реле обратной последовательности за счет переходных процессов в фильтрах, обусловленных, во-первых, внезапным изменением тока или напряжения в первичной цепи и, во-вторых, появлением апериодической составляющей в токе и напряжении при к. з. В результате отмеченных причин в начальный момент трехфазного к. з. на выходе фильтра появляются напряжение и ток обратной последовательности; они быстро затухают, однако продолжительность их появления достаточна для действия пускового реле H_2 . Из сказанного следует, что к. з. в отличие от качаний всегда сопровождаются длительным или кратковременным появлением U_2 и I_2 .

Принцип действия блокировки с реле обратной последовательности состоит в том, что она разрешает работе защите при появлении тока или напряжения обратной последовательности и не позволяет ей производить отключение, если несимметрия, характеризующаяся появлением U_2 и I_2 , отсутствует.

Такая блокировка работает как пусковой орган, пускающий защиту только при к. з. и не действующий при нагрузке и качаниях. Для действия при трехфазных к. з. схема блокировки выполняется с фиксацией кратковременной несимметрии. Имеются два варианта схем, различающихся по способу их возврата в начальное состояние после к. з.: с быстрым возвратом после отключения к. з. и с возвратом через определенное время после прекращения к. з.

Блокирующее устройство с быстрым возвратом (рис. 13-4) состоит из пускового реле H_2 , реагирующего на напряжение (или ток) обратной последовательности; промежуточного реле P_Φ , фиксирующего срабатывание H_2 и замыкающего при своем действии цепь отключения блокируемой защиты; реле времени B , осуществляющего возврат реле P_Φ , и реле понижения напряжения H_3 , включенного на линейное напряжение и предназначенного для действия при трехфазных к. з.

Для обеспечения надежного действия блокирующего устройства при симметричных трехфазных к. з. пусковое реле H_2 должно быть особо быстродействующим, чтобы реагировать на появление кратковременной несимметрии, а промежуточное реле P_Φ должно срабатывать даже тогда, когда реле H_2 действует кратко- временно.

Чтобы достигнуть быстродействия, пусковое реле H_2 работает на размыкание контактов. Необходимая быстрота действия реле P_Φ получается при помощи особой схемы его пуска, позволяющей фиксировать появление кратковременной несимметрии. Для этой цели обмотка реле P_Φ непрерывно питается током через замкнутые контакты реле H_2 и P_Φ . Таким образом, при нормальном режиме сети реле P_Φ находится в сработанном состоянии и держит контакты в положениях, показанных на рис. 13-4. При появлении несимметрии (длительной или кратковременной) реле H_2 срабатывает и прерывает ток в обмотке реле P_Φ . Последнее отпадает и размыкает контактом $P_{\Phi 1}$ цепь своей обмотки, благодаря чему реле P_Φ остается в отпавшем состоянии независимо от положения контактов пускового реле H_2 . Отпав, реле P_Φ замыкает цепь защиты и пускает реле времени B , которое с выдержкой времени, достаточной для срабатывания защиты, замыкает свои контакты и подает ток в обмотку реле P_Φ .

Реле P_Φ срабатывает и вновь размыкает цепь защиты, запрещающая ей действовать.

Если к моменту срабатывания реле P_Φ к. з. не прекратилось, то реле времени B удерживается в сработанном состоянии контактами реле H_2 или H_3 в зависимости от вида к. з. Благодаря этому промежуточное реле P_Φ не может подействовать вновь и цепь отключения защиты остается разомкнутой, чем предотвращается возможность ложной работы защиты при качаниях, возникающих во время к. з.

Полный возврат блокировки и готовность ее к повторному действию наступают после возврата реле H_2 и H_3 , т. е. немедленно после прекращения к. з.

Реле H_3 может работать и при качаниях. Чтобы исключить при этом пуск реле времени B , в цепи, замыкаемой контактами реле H_3 , включено сопротивление r . Его величина выбрана такой, чтобы ограничить ток в реле времени до величины, достаточной для удержания его в сработавшем состоянии, но недостаточной для его пуска.

Рассмотренная блокировка не исключает неправильной работы защиты в следующих случаях:

а) при качаниях, возникших в первый момент к. з., пока контакты реле Π_{ϕ} еще не разомкнули цепь отключения защиты;

б) при появлении во время качаний несимметрии, вызванной включением или отключением выключателя или какой-либо иной причиной. В результате этой несимметрии блокировка замыкает цепь защиты и последняя может сработать от качаний;

в) при несинхронном включении линии от АПВ, так как в этом случае защита вводится в действие от появившейся в момент включения несимметрии и может сработать от качаний, возникших после включения;

г) при удаленных трехфазных к. з., при которых реле напряжения H_3 может не действовать, в то время как реле H_2 оказывается чувствительным и срабатывает. В этом случае при отключении к. з. возможен повторный запуск блокировки от кратковременного появления несимметрии, что может повлечь за собой неправильное действие защиты под влиянием возникших качаний.

Напряжения (или ток) срабатывания реле H_2 выбирается из условия отстройки от небаланса в нормальном режиме и при качаниях и надежного действия при несимметричных к. з. в пределах защищаемого участка. Напряжения срабатывания реле H_3 берется максимально возможным по условию возврата реле при минимальном уровне рабочего напряжения

$$U_{с.р} = \frac{k_{н}}{k_{воз}} U_{раб. мин.}$$

Блокирующее устройство с возвратом через определенное время t_v (рис. 13-5). Пусковое реле H_2 реагирует на появление несимметрии. Как и на рис. 13-4, оно выполняется с помощью реле напряжения или тока обратной последовательности. Для фиксации кратковременной несимметрии при трехфазных к. з. служит промежуточное реле Π_{ϕ} , находящееся в нормальных условиях под током. При срабатывании пускового реле H_2 в реле Π_{ϕ} исчезает ток, якорь реле Π_{ϕ} отпадает и оно срабатывает, производя следующие операции: замыкает контакт $\Pi_{\phi 3}$, разрешая работать защите, размыкает контакт $\Pi_{\phi 1}$, предотвращая возврат реле Π_{ϕ} при возврате H_2 ; замыкает контакт $\Pi_{\phi 2}$,пуская реле времени B . Реле B приходит в действие, его мгновенный контакт

B_1 (пижний) замыкается, обеспечивая самоудерживание реле B , второй мгновенный контакт B_2 размыкается, прерывает ток в обмотке реле Π_a . Якорь реле Π_b с выдержкой времени порядка 0,2—0,3 с отпадает, при этом контакт реле Π_b замыкается, восстанавливая ток в реле Π_ϕ . Якорь последнего притягивается и блокирует соответствующие цепи защиты. Поскольку контакт Π_b шунтирует контакт пускового реле H_2 , то блокировка не может подействовать до возврата реле Π_b . Возврат реле Π_b происходит после прекращения работы реле времени, осуществляемого с помощью контакта B_3 , который замыкается по истечении установленной на нем выдержки времени t_3 . Это время принимается больше времени действия резервных защит сети для предотвращения действия блокировки в момент отключения к. з. от возникающей при этом несимметрии.

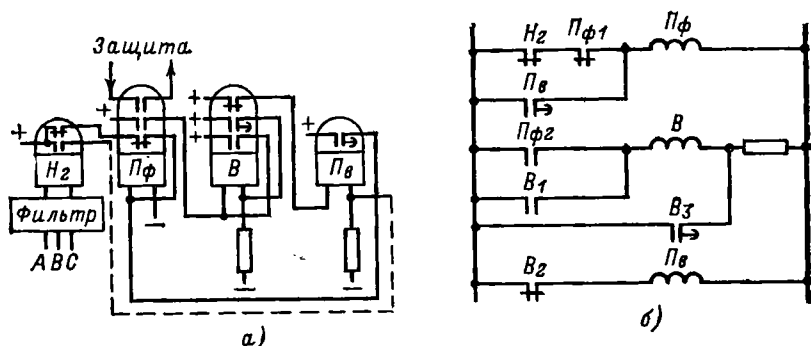


Рис. 13-5. Принципиальная схема устройства блокировки защиты при качаниях с возвратом через определенное время. Контакты реле показаны в состоянии готовности к действию.

Недостатком схемы с возвратом через заданное время t_b является то, что она выводит из действия защиту на несколько секунд после любой несимметрии в сети (включение и отключение выключателя, действия разрядника и т. п.). Если в этот момент на защищаемой линии возникает повреждение, то блокируемая защита не сможет подействовать. Появление отмеченного недостатка может привести к тяжелой аварии, поэтому следует отдавать предпочтение схеме с немедленным возвратом (рис. 13-4). Цепь, показанная пунктиром на схеме рис. 13-5, предусмотрена для предотвращения многократного запуска блокировки при появлении U_2 из-за обрыва вторичных цепей трансформатора напряжения, питающего фильтр напряжения обратной последовательности.

На рассмотренном принципе изготавливаются блокировки от качания типов КРБ-123 и КРБ-126. Первая реагирует на появление U_2 и I_0 , а вторая — на I_2 и I_0 .

Блокировка при качаниях типа КРБ-126 (рис. 13-6, а). Блокировка разрешает работать защите при к. з. и выводит ее из действия при качаниях и в нор-

мальном режиме. Пусковой орган блокирующего устройства $1PT$ реагирует на ток обратной последовательности I_2 и дополнительно, для повышения чувствительности при к. з. на землю, на ток $3I_0$. Ток I_2 получается с помощью фильтра обратной последовательности Φ_2 , на выход которого включен понизительный трансформатор $ТП$. Ток $3I_0$ получается от трансформатора тока $4TT$, который включен в рассечку нулевого провода трансформаторов тока.

Токи I_2 и $3I_0$ выпрямляются выпрямителями $2BM$ и $3BM$, суммируются и подаются в обмотку P исполнительного реле пускового органа $1PT$. В качестве исполнительного реле служит поляризованное реле с двумя обмот-

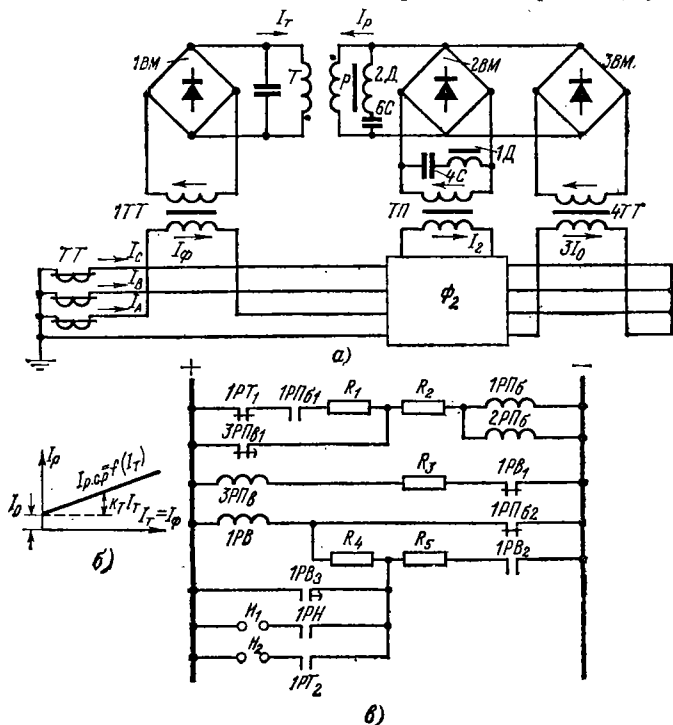


Рис. 13-6. Принципиальная схема блокировки при качаниях типа КРБ-126. Контакты показаны при отсутствии тока в реле.

ками: рабочей P и тормозной T . Тормозная обмотка T питается выпрямленным током одной из фаз I_ϕ и действует на размыкание контактов реле $1PT$. Рабочая обмотка P (питаемая током I_2 и $3I_0$) действует на замыкание контактов.

Ток срабатывания реле $1PT$ (рис. 13-6, б) зависит от величины тормозного тока $I_T = I_\phi$ и выражается уравнением $I_{с.р} = I_0 + k_T I_T$, где k_T — коэффициент торможения, зависящий от соотношения витков рабочей и тормозной обмоток; I_0 — ток срабатывания реле при отсутствии торможения.

Торможение предусмотрено для предотвращения ложной работы пускового органа блокировки во время качаний. Качания являются симметричным режимом, и поэтому, как уже отмечалось, составляющие I_2 и I_0 в первичных токах качаний отсутствуют. Однако при больших токах качаний трансформа-

торы тока работают со значительными погрешностями, в результате чего вторичные токи качаний искажаются по величине и фазе и становятся несимметричными. В них появляется составляющая обратной последовательности I_2 . В результате этого, а также вследствие погрешности самого фильтра в реле появляется ток небаланса $I_{нб}$, под действием которого оно может сработать. Торможение с помощью тока фазы I_ϕ заглубляет реле и исключает возможность его действия от $I_{нб}$ в симметричных режимах. При к. з. токи I_2 и I_0 достаточно велики, поэтому несмотря на наличие торможения реле надежно работает (см. рис. 13-6, б).

Чувствительность пускового органа и коэффициент торможения k_T регулируются изменением витков обмоток трансформаторов $1TT$, $ТП$ и $4TT$. Конденсатор $6C$ и дроссель $2Д$ сглаживают кривую выпрямленного тока. Конденсатор $4C$ и дроссель $1Д$ являются фильтром, отсекающим токи высших гармоник (главным образом 5-й), которые могут вызвать появление токов небаланса в реле, так как соотношение сопротивлений плеч фильтра Φ_2 подобраны для частоты 50 Гц. Трансформаторы $ПТ$ и $4ТТ$ предназначены для уменьшения величин токов I_2 и I_0 до значений, безопасных для выпрямителей.

Схема оперативных цепей приведена на рис. 13-6, а, она выполнена аналогично схемам на рис. 13-4 и 13-5. В качестве реле, фиксирующего появление несимметрии (реле $П_\phi$ в схемах на рис. 13-5 и 13-6), служат реле $1РП_6$ и $2РП_6$. Нормально, при отсутствии к. з., когда I_2 и $I_0 = 0$, контакты пускового реле $1РТ$ замкнуты и, как видно из схемы на рис. 13-6, а, обмотки реле $1РП_6$ и $2РП_6$ питаются током. При появлении к. з. возникает I_2 , а при к. з. на землю и I_0 . Пусковое реле $1РТ$ срабатывает, размыкая контактом $1РТ_1$ ток в обмотках $1РП_6$ и $2РП_6$, в результате чего якоря обоих реле отпадают. При этом контакт реле $1РП_6$ размыкает цепь питания своей обмотки, фиксируя тем самым появление тока I_2 и I_0 , до тех пор пока не сработает реле $3РП_в$, восстанавливающее ток в обмотках реле $1РП_6$ и $2РП_6$. Контакты реле $2РП_6$ ($2РП_{62}$, $2РП_{63}$, $2РП_{64}$) замыкают блокируемые цепи защиты (например, первую, вторую зону защиты или всю защиту в целом), разрешая им работать. Реле $1РП_6$, отпадая, пускает реле времени $1РВ$. Последнее замыкает мгновенный контакт $1РВ_1$, обеспечивая самоудерживание реле, и размыкает второй мгновенно действующий контакт $1РВ_2$, который разрывает цепь тока промежуточного реле $3РП_в$. Реле $3РП_в$ отпадает с замедлением 0,2—0,3 с и шунтирует контакты $1РТ_1$ и $1РП_{61}$, замыкая цепь реле $1РП_6$ и $2РП_6$. В обоих реле появляется ток, они срабатывают и выводят защиту из действия (контакты $2РП_{62}$ — $2РП_{64}$ размыкаются). Поскольку контакты $1РТ$ зашунтированы контактами $3РП_в$, то защита остается заблокированной. Она не сможет поддействовать, если $1РТ$ сработает снова. По истечении времени $t_в$, установленного на реле времени $1РВ$, его контакт $1РВ_3$ замкнется, зашунтирует обмотку $1РВ$ и реле $1РВ$ прекратит свою работу, при этом оно возвратится в начальное состояние и разомкнет контакты. После возврата $1РВ$ реле $3РП_в$ сработает, разомкнет цепь, шунтирующую контакты $1РП_{61}$ и $1РТ_1$, затем блокировка снова будет готова к действию.

Для осуществления схемы блокировки с быстрым возвратом используются контакты реле $1РТ$ и реле минимального напряжения $1РН$, шунтирующие обмотку реле времени $1РВ_6$, при прекращении к. з. Реле $1РН$ включено на линейное напряжение и срабатывает при появлении трехфазного к. з. Вместо контакта реле $1РТ$ для шунтирования реле времени можно использовать пусковые реле блокируемой защиты.

Выбор уставок пусковых реле блокировки, выполненных по рис. 13-4 и 13-5. Реле напряжения или тока H_2 должно быть отстроено от максимальных небалансов, возникающих на выходе фильтра, при симметричных режимах и должно надежно работать при двухфазных и однофазных к. з. в конце зоны блокируемой ступени защиты (например, если блокируется только первая зона

дистанционной защиты, то при к. з. в конце этой зоны). По первому условию

$$U_{2с.р} = k_n U_{нб.ф} \quad \text{или} \quad I_{2с.р} = k_n I_{нб.ф}, \quad (13-4)$$

где $U_{нб.ф}$ — напряжение небаланса при максимальном значении рабочего напряжения, а $I_{нб.ф}$ — ток небаланса при максимальном значении токов качания ($I_{кач}$ достигает максимума при $\delta = 180^\circ$).

По второму условию

$$U_{2с.р} = \frac{U_{2мин}}{k_{ч} n_{ч}} \quad \text{или} \quad I_{2с.р} = \frac{I_{2мин}}{k_{ч} n_{ч}}, \quad (13-5)$$

где $U_{2мин}$ и $I_{2мин}$ — минимальное напряжение и ток обратной последовательности при к. з. в конце зоны блокируемой защиты; $k_{ч}$ — коэффициент чувствительности, равный 1,5.

При недостаточной чувствительности реле обратной последовательности применяется комбинированный пуск от U_2 и I_0 или блокировка с токовым пуском I_2 и I_0 . В этой схеме предусмотрено торможение от тока в фазе. Оно используется, если токи качания и создаваемые ими небалансы очень велики. Торможение загроубляет реле и повышает, таким образом, отстройку его от $I_{нб.ф}$.

Напряжение срабатывания реле H_3 выбирается максимально возможным по условию возврата при минимальном уровне рабочего напряжения:

$$U_{с.з} = \frac{k_n}{k_{воз}} U_{раб. мин}. \quad (13-6)$$

Выбор установок блокировки от качаний с пусковыми реле, реагирующими на I_2 и I_0 и имеющими торможение (блокировка типа КРБ-126), приведен в [Л. 81].

13-5. УСТРОЙСТВО БЛОКИРОВКИ ЗАЩИТЫ ПРИ КАЧАНИЯХ, РЕАГИРУЮЩЕЕ НА СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА, НАПРЯЖЕНИЯ ИЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Скорости изменения электрических величин при к. з. и качаниях различны. В первом случае ток, напряжение и сопротивление изменяются почти мгновенно от своей нормальной величины до значения при к. з. (рис. 13-7).

При качаниях те же величины меняются постепенно. Это различие и положено в основу схемы блокировки, изображенной на рис. 13-8. Устройство блокировки выполняется при помощи двух пусковых реле: $ПР_1$ и $ПР_2$. Оба реле реагируют на ток, напряжение или сопротивление, но имеют разные уставки срабатывания. Реле $ПР_1$ чувствительнее реле $ПР_2$. Предположим, что в нашем случае используются реле сопротивления. При появлении качаний сопротивление на зажимах пусковых реле начнет плавно снижаться (рис. 13-7, в). Первым срабатывает более чувствительное реле $ПР_1$, а затем через время t' — более грубое реле

PP_2 . Благодаря этому цепь катушки промежуточного реле $П$ кратковременно замыкается (на время t') и оно успевает подействовать. Сработав, реле $П$ блокирует защиту и самоудерживается до тех пор, пока более чувствительное пусковое реле PP_1 не разомкнет свои контакты.

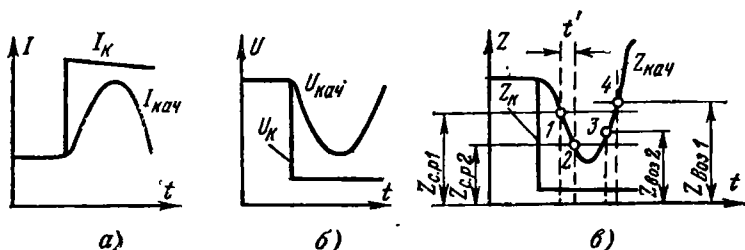


Рис. 13-7. Сравнение характера изменения электрических величин при к. з. и качаниях.

a — тока; b — напряжения; $в$ — сопротивления.

При к. з. пусковые реле PP_1 и PP_2 срабатывают одновременно. Поэтому реле $П$, осуществляющее блокировку защиты, не успевает подействовать.

Чем меньше период качаний, тем меньше интервал времени t' между срабатываниями реле PP_1 и PP_2 (рис. 13-7, $в$). Если время t' окажется меньше времени действия реле $П$, то последнее не срабатывает и защита не будет заблокирована.

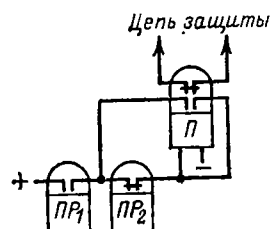


Рис. 13-8. Принцип действия устройства блокировки защиты при качаниях, реагирующего на скорость изменения тока, напряжения или сопротивления.

Для повышения надежности действия блокировки необходимо повышать быстроту действия промежуточного реле $П$ и увеличивать разницу в уставках пусковых реле.

Исходя из этого условия соотношение между уставками реле PP_1 и PP_2 должно быть не меньше 1,6—2. В большинстве случаев используются устройства, реагирующие на скорость изменения z .

Уставка срабатывания реле PP_1 ($z_{с.р1}$) выбирается такой, чтобы реле не действовало в нормальном режиме

с учетом коэффициента возврата реле, т. е. $z_{с.р1} = \frac{k_n}{k_{воз}} z_{раб. мин.}$

В качестве реле PP_1 может использоваться пусковое реле блокируемой защиты. Сопротивление срабатывания реле PP_2 выбирается равным $z_{с.р2} = z_{с.р1} / 1,6 \div 2$.

Применение рассмотренного принципа затруднено на длинных и сильно нагруженных линиях из-за того, что по условию отстройки от нагрузки $z_{с.р1}$ относительно мало, а $z_{с.р2}$ для недейст-

вия блокировки при к. з. должно иметь достаточно большое значение.

В СССР блокировка, реагирующая на скорость изменения электрических величин, применяется редко. В качестве типовой используется схема, реагирующая на появление несимметрии, поскольку она оказывается пригодной как на коротких, так и на длинных линиях.

Принципиальным недостатком блокировки от качаний, реагирующей на составляющие обратной последовательности (U_2 и I_2), является ее действие при несимметричных режимах в нормальных условиях, когда нет к. з. Такие режимы возможны, поэтому ведутся поиски более совершенных способов блокировки.

ГЛАВА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

14-1. ЗАЩИТА ЛИНИЙ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Особенности линий электропередачи сверхвысокого напряжения

Электрические сети напряжением 500 кВ и выше, сооружаемые для передачи больших мощностей на далекие расстояния, условно называются сетями сверхвысокого напряжения. В СССР

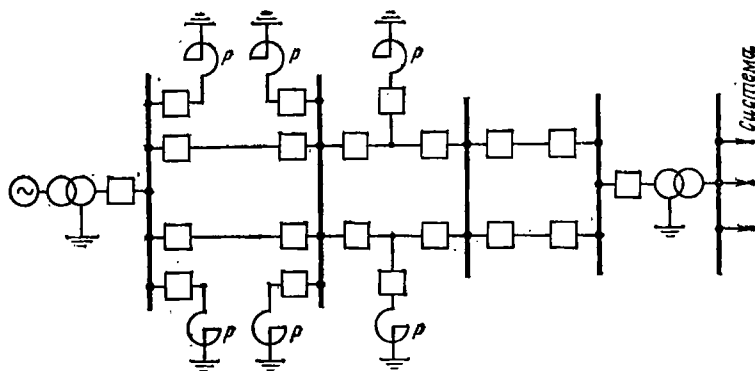


Рис. 14-1. Схема двухцепной электропередачи сверхвысокого напряжения.

построены электропередачи 500 кВ длиной 900—1 200 км с пропускной способностью порядка 1 500 МВт [Л. 59]. Для передачи больших нагрузок на еще большие расстояния проектируются и сооружены линии и подстанции 750 кВ.

Подобные передачи имеют ряд специфических особенностей:

1. В связи с большим значением токов нагрузки (1 000—2 000 А) сечение проводов получается очень большим, поэтому по конструктивным соображениям, а также с целью уменьшения индуктивного сопротивления передачи ее фазы выполняются расщепленными обычно на три параллельно идущих провода.

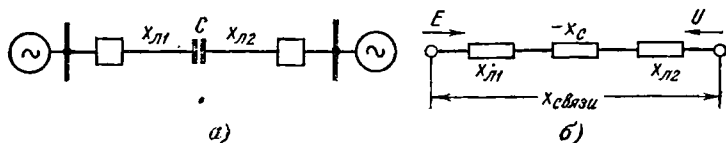


Рис. 14-2. Продольная емкостная компенсация электропередачи сверхвысокого напряжения.

а — схема включения конденсаторов; б — схема замещения.

2. На дальних передачах устанавливаются реакторы P (рис. 14-1) для компенсации большого емкостного тока линий.

3. Для повышения пропускной способности передачи иногда применяется продольная емкостная компенсация (рис. 14-2). Конденсаторы C , включенные последовательно в фазы линии, уменьшают (компенсируют) индуктивное сопротивление цепи.

б) Особенности условий работы релейной защиты передач сверхвысокого напряжения

Рассмотренные особенности линий электропередачи 500 и 750 кВ оказывают существенное влияние на требования, предъявляемые к релейной защите, и условия ее работы:

1. Линии электропередачи 500 и 750 кВ работают с малым запасом по статической и динамической устойчивости, так как по экономическим соображениям они проектируются с максимально возможной нагрузкой.

Поэтому, как правило, к. з. в любой точке такой линии необходимо отключать со временем не более чем 0,1—0,12 с. С учетом, что современные выключатели действуют с временем порядка 0,08 с, собственное время релейной защиты не должно превышать 0,02—0,04 с. Таким образом, на передачах сверхвысокого напряжения к релейной защите предъявляются особенно высокие требования в части быстроты действия.

2. Благодаря большой длине линий и высокой загрузке токи I_p и сопротивления z_p в нормальных режимах и при к. з. во многих случаях оказываются соизмеримыми, что усложняет выполнение защиты и требует применения устройств с повышенной чувствительностью.

3. Вследствие большого значения емкостной проводимости ωC линии электропередачи 500 и 750 кВ и высокого уровня рабо-

чего напряжения $U_{\text{л}}$ емкостные токи $I_C = U_{\text{л}} \omega C$ на линиях сверхвысокого напряжения значительно превосходят аналогичные токи в сетях 110 и 220 кВ.

Ток I_C одного километра линии при номинальном напряжении составляет: в сети 500 кВ — $1 \div 1,2$ А, в сети 220 кВ — 0,34 А, а в сети 110 кВ — 0,2 А.

В результате этого емкостные токи на передачах сверхвысокого напряжения оказывают в некоторых случаях заметное влияние на работу релейной защиты.

При анализе и расчетах распределенную емкость фазы линии обычно заменяют сосредоточенной емкостью C по Т- или П-образной схеме. Как следует на рис. 14-3, ток на одном конце линии

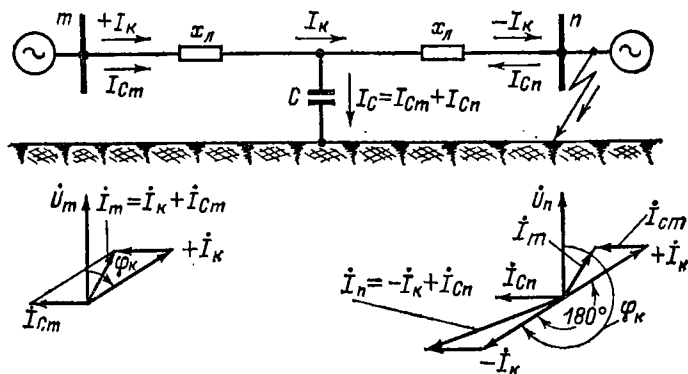


Рис. 14-3. Схема замещения электропередачи с учетом емкостной проводимости и векторные диаграммы токов при внешнем к. з.

равен геометрической сумме, а на другом — геометрической разности тока I_C и сквозного тока I_k , так $I_m = I_k + I_{Cm}$, а $I_n = I_{Cn} - I_k$. Таким образом, ток I_C искажает величину и фазу тока, проходящего по линии. Чем больше I_C и меньше I_k , тем сильнее искажающее влияние емкостных токов.

Указанное искажение фаз токов в линии оказывает влияние на работу дифференциально-фазной и направленной высокочастотных защит.

Характерный случай недопустимого влияния тока I_C на поведение дифференциально-фазной защиты типа ДФЗ показан на рис. 14-4.

Защита ДФЗ-2 сравнивает фазы токов $I_1 + kI_2$, при этом составляющая kI_2 преобладает.

На рис. 14-4 представлено распределение токов I_2 по параллельным линиям при несимметричном к. з. в точке К. Если при этом напряжение U_2 на шинах m и n окажется одинаковым, то в неповрежденной линии L_1 будет проходить только емкостный

ток (сквозной ток $I_2 = 0$). На обоих концах линии емкостный ток равен $I_{2C}/2$ и имеет одинаковую фазу. Это значит, что фазы токов на концах неповрежденной линии будут такими же, как и при к. з. на ней. Благодаря этому дифференциально-фазная защита на неповрежденной линии Λ_1 будет действовать под влиянием емкостного тока неправильно.

Искажающее влияние емкостной проводимости на токи к. з. устраняется применением устройства, компенсирующего ток I_C во вторичном токе трансформаторов тока, питающих защиту. При наличии компенсации ток, питающий защиту, будет равен току к. з. Такая компенсация получила применение в дифференциально-фазных защитах линий 500 и 750 кВ.

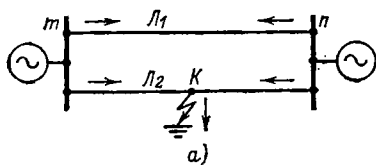
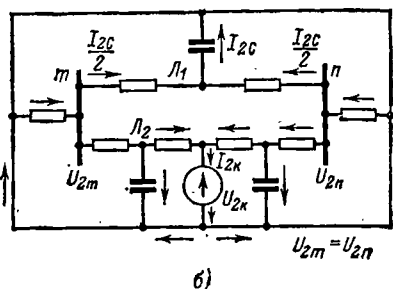


Рис. 14-4. Распределение токов по параллельным линиям при несимметричном коротком замыкании в точке К с учетом емкостной проводимости линий.



а — схема электропередачи; б — схема замещения для обратной последовательности.

4. На линиях 500 и особенно 750 кВ при появлении и отключении к. з., а также при оперативных переключениях возникают электромагнитные переходные процессы, обусловленные наличием индуктивного сопротивления шунтирующих реакторов, емкости продольной компенсации и распределенных постоянных L и C длинных линий. Переходные процессы сопровождаются появлением аperiodической составляющей и токов высших и низших частот. Аperiodический ток искажает вторичный ток, питающий защиту, и может вызвать неправильную работу быстродействующих измерительных органов.

Появление составляющих другой частоты нарушает правильное действие отдельных элементов защиты и может вызвать её ложную работу. Нежелательное влияние токов с частотой, отличной от 50 Гц, устраняется применением частотных фильтров, пропускающих в защиту только токи основной частоты.

5. Емкость C устройства продольной компенсации (УПК) уменьшает реактивное сопротивление линий электропередачи и оказывает вследствие этого влияние на величину и фазу токов и сопротивлений, на которые реагируют токовые, дистанционные и направленные защиты.

Особенности условий работы некоторых защит на линиях с УПК рассмотрены ниже.

Токовые отсечки. Ток к. з., на который реагирует отсечка,

$$I_K = \frac{E}{x_{AK}},$$

где x_{AK} — реактивное сопротивление сети от источника питания до точки к. з. K (рис. 14-5, а).

При к. з. до УПК сопротивление $x_{AK1} = x_C + x_{LK}$, оно растет при удалении точки к. з. K , в связи с чем ток I_K (рис. 14-5, б) уменьшается.

В случае к. з. за УПК $x_{AK2} = x_C + x_{LK} - x_{УПК}$. Таким образом, при перемещении места к. з. из K_1 в K_2 ток к. з. увеличивается скачком от I_{K1} до I_{K2} , так как из-за компенсирующего действия емкости C УПК $x_{AK2} < x_{AK1}$.

По мере дальнейшего перемещения точки K_2 ток I_K снова уменьшается за счет роста x_{LK} .

Характер изменения тока в зависимости от расстояния до места к. з. на линии с УПК изображен на рис. 14-5, б кривой 1. Для сравнения пунктиром показана та же зависимость при отсутствии УПК (кривая 2).

Ток срабатывания мгновенной отсечки выбирается так, чтобы она не действовала за пределами защищаемой линии.

Из приведенных кривых 1 и 2 видно, что при наличии УПК $I''_{с.з} > I'_{с.з}$, а зона действия отсечки соответственно меньше, чем при отсутствии УПК ($OA < OB$).

Таким образом, продольная компенсация существенно снижает эффективность токовой отсечки и ограничивает возможность ее применения.

Аналогично влияет УПК и на токовые отсечки нулевой последовательности, но в меньшей степени, поскольку x_0 линии в 2—3 раза больше x_1 , а x_0 и x_1 УПК одинаковы, поэтому емкостное сопротивление $x_{УПК}$ в меньшей степени снижает суммарное индуктивное сопротивление x_0 сети и линии от места установки защиты до точки к. з.

Дистанционная защита. На рис. 14-6 показан характер изменения сопротивления $z_p = z_{AK}$ при удалении точки к. з. K от

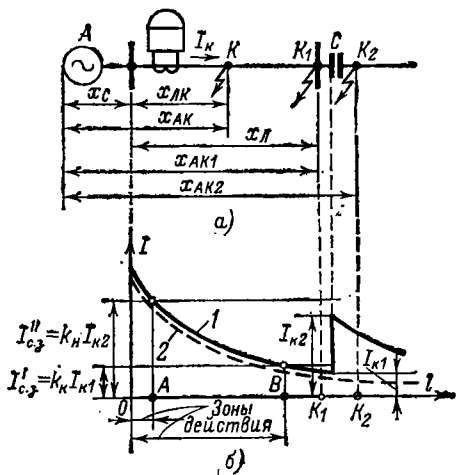


Рис. 14-5. Влияние устройства продольной емкостной компенсации (УПК) на работу токовой отсечки.

а — участок сети с УПК; б — характер изменения тока к. з. и зона действия отсечки при наличии и отсутствии УПК (кривые 1 и 2).

тивление УПК преобладает над индуктивным сопротивлением линии, от места установки защиты до места включения продольной компенсации. Например, для защиты P_1 при $x_{упк} > x_{ас} = x_{у/ас} = x_{л}$ сопротивление $z_{к2}$ в случае повреждения в точке K_2 и за ней имеет емкостный характер, т. е. его индуктивная составляющая имеет отрицательный знак, поэтому вектор $z_p = z_{к2}$ расположен в IV квадранте (см. рис. 14-6, *г*). Это означает, что реле P_1 не будет действовать, оно воспринимает это к. з. как повреждение до шин А.

Интересно отметить, что и реле P_3 , находящееся у места к. з. (при повреждении в K_2), отказывает в действии по той же причине, так как $x_{упк} > x_{вс}$. В то же время реле P_2 придет в действие, хотя по своему принципу оно не должно работать. При индуктивном сопротивлении участка BC (к. з. в K_1) z_{p_2} на реле P_2 имеет отрицательный знак и располагается в III квадранте (рис. 14-6, *б*), если же сопротивление BC станет емкостным (при к. з. в K_2), то вектор z_{p_2} попадает во II квадрант, в часть, охваченную характеристикой реле, и оно неправильно срабатывает.

Из всего сказанного следует, что наличие УПК весьма существенно влияет на поведение дистанционных защит, искажая величину и знак z_p и приводит к неправильным действиям этих защит. Применение дистанционных защит в сети с УПК возможно при условии ограничения их зон действия и при относительно небольшом значении $x_{упк}$. Например, если $x_{упк} < x_{ав}$, то первая зона защиты P_1 должна быть отстроена от $z_{к2}$, как представлено на рис. 14-6, *а* (окружность 1), вторая зона (окружность 2) должна охватывать остальную часть линии, не вошедшую в первую зону. Защиту P_2 можно применять только с выдержкой времени, поскольку она теряет направленность при к. з. за УПК. Защита P_3 , как правило, неэффективна (с учетом ее отказа в работе при к. з. за УПК).

Направленная защита (токовая). Наличие продольной компенсации может вызывать отказ и неправильное действие реле направления мощности в направленных защитах. Например, реле мощности, расположенное в P_2 (рис. 14-6, *а*), может неправильно работать при к. з. в точке K_2 за УПК (см. характеристику реле 1 на рис. 14-6, *б*).

в) Выполнение защит на электропередачах 500 кВ

Отмеченные выше особенности дальних передач и условий работы защиты потребовали разработки специальных устройств, позволяющих обеспечить повышенное быстродействие, высокую чувствительность и правильную работу органов защиты в нормальных и аварийных режимах электрических сетей 500 кВ с учетом влияний емкостной проводимости, продольной и поперечной компенсаций.

Принципы защиты дальних передач. Основная защита на дальних электропередачах должна обеспечивать отключение к. з. без выдержки времени в пределах всей защищаемой линии. Из известных в настоящее время защит этому требованию удовлетворяют дифференциально-фазные и направленные высокочастотные защиты, а также дистанционные с высокочастотной блокировкой. В СССР в качестве основной защиты на линиях 500 кВ применяются дифференциально-фазные защиты ДФЗ-501 и ДФЗ-503, разработанные с учетом особенностей дальних передач. На линиях 750 кВ применяется направленная защита с в.ч. блокировкой типа НДФЗ-750 с $t = 0,02$ с. В качестве резервных защит используются ступенчатые направленные защиты нулевой последовательности и дистанционные защиты.

С учетом того, что отказ в действии основной быстродействующей защиты и особенно одновременный отказ в работе основной и резервной защит могут привести к нарушению устойчивости электропередачи и вызвать тяжелую аварию системного значения, релейная защита дальних передач сверхвысокого напряжения должна обладать особенно высокой надежностью действия.

Для этой цели помимо повышенной надежности самих устройств релейной защиты, применяемых на дальних электропередачах, необходимо выполнить два условия: 1) предусмотреть разделение токовых цепей и оперативных цепей основной и резервной защит так, чтобы неисправность любого элемента одной защиты не могла привести к отказу в действии другой защиты, 2) обеспечить при отказе основной защиты работу резервной защиты с выдержкой времени, гарантирующей сохранение устойчивости электропередачи. Это можно достигнуть ускорением вторых зон резервных защит с помощью высокочастотной блокировки или передач отключающих импульсов на противоположный конец линии при действии быстродействующей ступени резервной защиты на одном из концов поврежденной цепи. Вторым вариантом, обеспечивающим сохранение устойчивости при отказе основной защиты, является установка наряду с резервной второй быстродействующей защиты. Вызванные этим удорожание и усложнение защиты вполне оправданы.

Дифференциально-фазная защита типа ДФЗ-501. Защита выполнена на тех же принципах, что и ДФЗ-2. Она основана на сравнении фаз токов $\dot{I}_1 + k\dot{I}_2$ и состоит из трех органов: пускового, манипуляции и сравнения фаз. Исполнение ее органов имеет некоторые особенности, обеспечивающие правильную работу защиты в специфических условиях дальних передач сверхвысокого напряжения.

Особенности пускового органа. 1. Проведенные сравнения показали, что на дальних передачах более чувствительным является пуск по U_2 . Поэтому, в дифференциально-фазной защите для длинных линий типа ДФЗ-501 пусковой орган защиты выполнен с помощью реле напряжения обратной последовательности.

Как было показано (§ 12-6, б), обязательным условием правильной работы защиты при внешних к. з. является работа в. ч. постов на обоих концах линии.

При включении пусковых реле на напряжение обратной последовательности в месте установки защиты (U_{2m} и U_{2n}) это условие выполняется не во всех случаях, так как напряжение U_2 уменьшается при удалении от точки к. з. (рис. 14-7). Вследствие этого имеется возможность срабатывания пусковых реле защиты только на одном конце линии, ближе к месту к. з. (рис. 14-7), что приводит к ложному действию.

Для устранения этого недостатка и обеспечения правильной работы защиты к пусковым реле на обоих концах линии должны подводиться равные напряжения U_2 . Это достигается включением пусковых реле на компенсированное напряжение обратной последовательности:

$$\dot{U}_{2p} = \dot{U}_2 - \dot{I}_2 z_{2K}, \quad (14-1)$$

где $\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ — напряжение и ток обратной последовательности в месте установки защиты; z_{2K} — сопротивление компенсации.

Сопротивление z_{2K} выбирается так, чтобы напряжение U_{2p} при внешнем к. з. соответствовало напряжению в середине защищаемой линии (точка N на рис. 14-7). Исходя из этого, z_{2K} принимается равным половине полного сопротивления линии z_n ($z_{2K} = z_n/2$). При таком включении пусковые реле на обоих концах линии получают одно и то же напряжение U_2 . Это обеспечивает одинаковые условия их работы и пуск высокочастотных постов на обеих сторонах линии при внешних к. з.

Компенсация напряжений U_2 осуществляется с помощью трансреактора TK , включенного в рассечку каждой фазы вторичной цепи трансформатора напряжения, питающего фильтр Φ_2 (рис. 14-8). Вторичная э. д. с. трансреактора TK $E_K = I_\phi z_{2K}$, где z_{2K} — сопротивление, обусловленное взаимной индукцией между обмотками TK , соответствующее сопротивлению компенсации. Первичная обмотка TK питается током I_ϕ .

Результирующее напряжение каждой фазы, подводимое к фильтру обратной последовательности Φ_2 , равно:

$$\dot{U}_{\text{рез. ф}} = \dot{U}_\phi - z_{2K} \dot{I}_\phi.$$

На выходе фильтра Φ_2 получается составляющая обратной последовательности этого напряжения, т. е. компенсированное напряжение $\dot{U}_{2p} = \dot{U}_{2\phi} - z_{2K} \dot{I}_{2\phi}$, как это требуется по выражению (14-1).

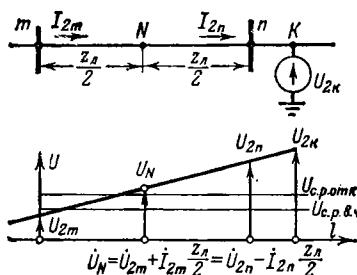
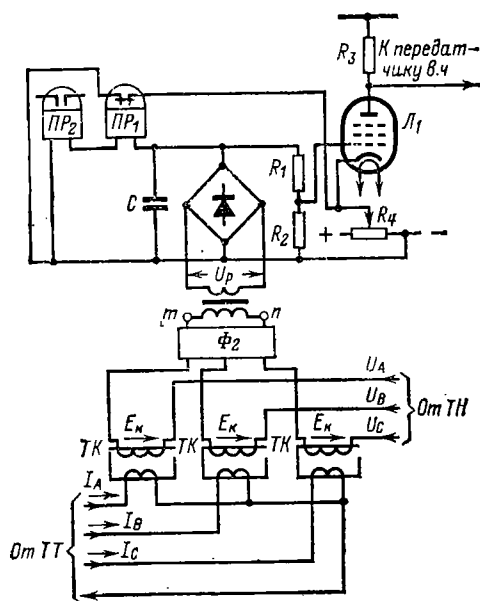


Рис. 14-7. Изменение напряжений обратной последовательности вдоль линии при внешнем к. з.

Для этой цели помимо обычного пуска от контактов пускового реле PP_1 (рис. 14-8) предусмотрен бесконтактный пуск, осуществляемый с помощью выпрямленного напряже-



ния U_p , питающего пусковые реле защиты PP_1 и PP_2 , которые подвоятся к лампе $\mathcal{L}_1$, управляющей работой передатчика.

В нормальных условиях $U_p = 0$, лампа L_1 открыта, к передатчику подается минус, вследствие чего передатчик не работает.

При появлении напряжения U_p потенциал сетки лампы L_1 по отношению к ее катоду становится отрицательным и лампа закрывается. В результате этого к передатчику через сопротивление подводится плюс и передатчик начинает работать. Контактный пуск производится при срабатывании реле PR_1 . Оно размыкает контакты и снимает минус с катода, при этом на катод L_1 подается положительное смещение с потенциометра R_4 , лампа L_1 открывается и передатчик приходит в действие.

3. При обрыве одной или двух фаз цепей напряжения, питающего фильтр Φ_2 , вторичное напряжение становится несимметричным, в нем появляется U_2 , могущее вызвать работу реле $ПР_1$ и $ПР_2$.

При этом происходит односторонний пуск защиты, вызывающий ее ложное действие. Для предупреждения этого в схеме защиты предусматривается блокировка, выводящая защиту из действия при обрыве цепей напряжения.

Особенности органа манипуляции. Орган манипуляции ДФЗ-501 состоит из комбинированного фильтра Φ_m , выполненного так же, как и в ДФЗ-2, и дополнительного устройства компенсации УК (рис. 14-9), устраняющего влияние емкостных токов пря-

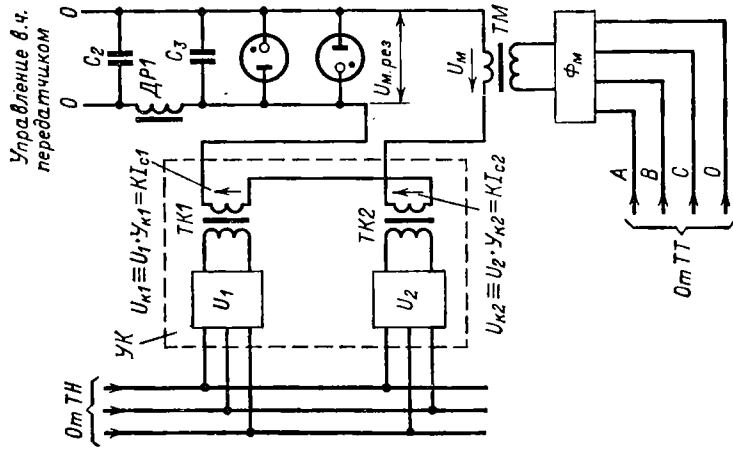


Рис. 14-9. Орган манипуляции ДФЗ-500.

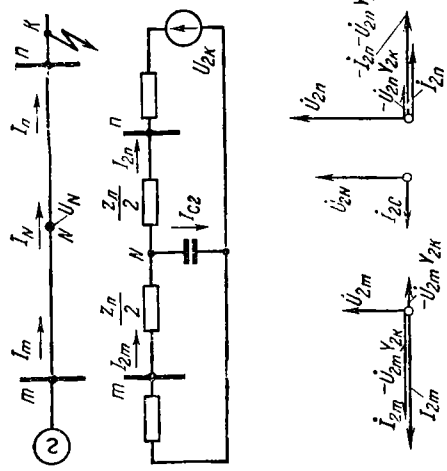


Рис. 14-10. Влияние емкостных токов обратной последовательности и их компенсация (условия компенсации $I_{2C} \cdot \dot{I}_{2m} = -\dot{U}_{2m} Y_{2C} = -(\dot{I}_{2n} + \dot{U}_{2n} Y_{2C}) = \dot{I}_N + \dot{U}_{2n} Y_{2C}$, где $\dot{I}_N = \dot{I}_{2n} + \dot{U}_{2n} Y_{2C}$ и $\dot{U}_{2n} = 2\dot{U}_N Y_{2C} = \frac{1}{2} \dot{U}_N$, где Y_{2C} — проводимость компенсации).

мой и обратной последовательностей защищаемой линии на величину и фазу напряжения $U_m \equiv (I_1 + kI_2)$, получаемого от фильтра Φ_m .

Компенсирующее устройство представляет собой фильтры напряжения прямой и обратной последовательностей U_1 и U_2 , питающие трансформаторы $TK1$ и $TK2$ соответственно. На выходе трансформаторов получаются напряжения U_{K1} и U_{K2} , пропорциональные прямой и обратной последовательности емкостных токов линии (I_{C1} и I_{C2}): $U_{K1} \equiv I_{C1}$, $U_{K2} \equiv I_{C2}$.

Как видно из рис. 14-9, эти напряжения включаются в выходную цепь трансформатора манипуляции TM , питаемого фильтром Φ_m , и уничтожают (компенсируют) емкостные составляющие напряжения U_m , обусловленные емкостными токами I_{C1} и I_{C2} .

На рис. 14-10 приведены векторные диаграммы токов обратной последовательности на обоих концах линии, поясняющие компенсацию емкостных токов обратной последовательности I_{C2} . Векторные диаграммы построены без учета активных составляющих сопротивлений сети.

Диаграммы показывают, что в результате компенсации сравниваемые вторичные токи на обоих концах линии при внешних к. з. получаются равными по величине и сдвинутыми по фазе на 180° . С помощью аналогичных диаграмм можно пояснить компенсацию емкостных токов прямой последовательности.

Для устранения влияния токов с частотой, отличной от 50 Гц, возникающих при неустановившихся режимах в сетях 500 кВ, предусмотрен специальный частотный фильтр. Фильтр состоит из дросселя $DP1$ и емкостей C_3 и C_2 (рис. 14-9), включенных на выходе органа манипуляции. Фильтр пропускает только токи с частотой 50 Гц. Защита ДФЗ-501 получила широкое распространение в СССР на линиях 500 кВ [Л. 59, 60]. Готовится к выпуску защита типа ДФЗ-503 с улучшенными схемами отдельных узлов: органа манипуляции, блокировки от нарушения цепей напряжения и др.

14-2. ЗАЩИТА ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

а) Линии с ответвлениями

За последнее время широкое распространение получают линии с ответвлениями, к которым подключаются подстанции, имеющие или не имеющие источников питания, как показано на рис. 14-11. Подключение таких подстанций к магистральным линиям может выполняться с выключателями на стороне высшего напряжения (рис. 14-11, а) или по упрощенным схемам — без выключателей (рис. 14-11, б).

В последнем случае возможны следующие варианты выполнения защиты и отключения трансформаторов, подключенных на ответвлениях, в случае их повреждения:

1. Защита трансформаторов осуществляется защитами магистральной линии на выключателях A и B . В этом случае трансформатор T подключается к линии наглухо (рис. 14-11, б).

2. Защита трансформатора на ответвлении выполняется с помощью плавких предохранителей Π (рис. 14-11, в).

3. На трансформаторе ответвления устанавливается релейная защита C от внутренних повреждений, которая действует на включение специального автоматического разъединителя K , называемого короткозамыкателем (рис. 14-11, г). При повреждении в

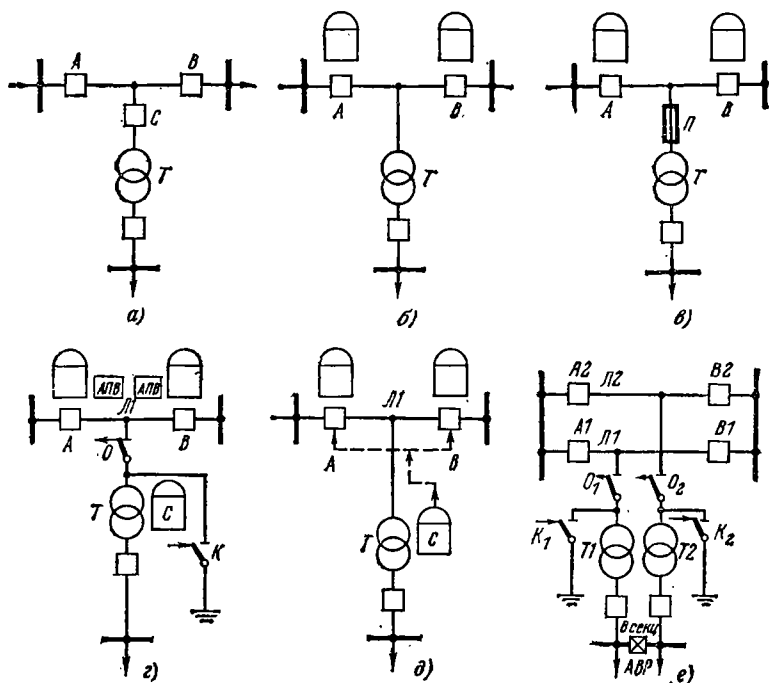


Рис. 14-11. Схемы линий с ответвлениями.

трансформаторе короткозамыкатель K включается и устраивает к. з. (однофазное или двухфазное), на которое реагирует защита магистральной линии, отключающая выключатели A и B . После отключения линии работает автоматический отделитель O , отключающий поврежденный трансформатор, и затем магистральная линия $Л$ включается в работу с помощью $АПВ$.

Таким образом, в рассмотренном варианте на трансформаторе устанавливаются отделитель и короткозамыкатель.

4. Как и в предыдущем случае, на трансформаторе устанавливается защита C . При повреждении в трансформаторе она срабатывает и посылает по специальным каналам (проводным или высоко-

частотным по линиям электропередачи) импульс на отключение выключателей *A* и *B* линии (рис. 14-11, *д*).

Этот способ требует дорогостоящих каналов связи. Но он позволяет быстрее отключать поврежденный трансформатор и упрощает силовую часть трансформатора.

Наибольшее распространение на практике получили первые три варианта.

Подключение ответвлениями применяется как на одинарных, так и на параллельных линиях. В последнем случае трансформаторы, подключенные к разным линиям, работают раздельно на стороне низшего напряжения (рис. 14-11, *е*). При отключении одной из линий или трансформатора с помощью *ABP* включается секционный выключатель $B_{\text{сек}}$ и питание потребителей секции, потерявшей напряжение, восстанавливается от второго трансформатора.

Выполнение релейной защиты линий с маломощными трансформаторами на ответвлениях обычно не вызывает затруднения.

Осуществление же защиты линий с ответвлениями, имеющими мощные трансформаторы, и особенно при наличии со стороны ответвления источников питания наталкивается на некоторые трудности в части обеспечения селективности, быстроты действия и чувствительности. Однако подключение подстанций с помощью ответвлений дает значительное удешевление их сооружения, позволяет экономить оборудование и аппаратуру, ускоряет строительство подстанций и удешевляет их эксплуатацию. Поэтому разработку вопросов защиты линий с ответвлениями следует считать важной и нужной задачей.

Рассмотрим применение основных видов защит на линиях с ответвлением.

б) Токовые и дистанционные защиты со ступенчатой характеристикой

Токовые ступенчатые защиты, реагирующие на ток фазы. На линиях с ответвлениями такие защиты устанавливаются на питающих концах линии (рис. 14-12). Для обеспечения селективности ток срабатывания быстродействующей ступени защиты (отсечка с $t = 0$) отстраивается не только от к. з. за пределами защищаемой линии (точки K_1 и K_2), но и от к. з. в K_3 за трансформатором отпайки (рис. 14-12) по выражению

$$I_{с.з} = (1,2 \div 1,3) I_{K3\text{макс}}, \quad (14-2)$$

где $I_{K3\text{макс}}$ — ток при к. з. в K_3 ; этот ток имеет максимальное значение при отключении линии на противоположном конце. При большой мощности трансформатора ответвления ток $I_{K3\text{макс}}$ может оказаться больше, чем ток при к. з. в K_2 или K_1 , что приведет к уменьшению зоны отсечки.

Неселективное действие первой ступени защиты при к. з. в трансформаторе ответвления исправляется с помощью *АПВ* следующим

образом. При к. з. в трансформаторе линия и трансформатор отключаются одновременно. Затем после автоматического отключения отделителя (рис. 14-11, *г, е*) линия включается от АПВ. Селективность второй и третьей ступени защит *А* и *В* линии к. з. на ответвлении обеспечивается согласованием выдержек времени этих ступеней с защитами M_T трансформатора ответвления. Третья зона защиты линий должна резервировать отказ выключателя *С* и максимальной защиты M_T трансформатора ответвления. При мало-мощных трансформаторах это требование часто оказывается трудно осуществимым.

При наличии источников питания на ответвлении защиты линий следует выполнять направленными, что облегчает выполнение условий селективности при к. з. за пределами линии.

Токовые защиты нулевой последовательности.

По условию селективности вторая и третья зоны защиты линии должны согласовываться с защитами трансформатора ответвления по времени, а первая зона защиты должна отстраиваться от к. з. за трансформатором, если при этом в линии *АВ* появляются токи нулевой последовательности. При соединении обмоток трансформатора по схеме Δ/Δ в случае замыкания на землю в сети треугольника токи I_0 в линии отсутствуют и поэтому наличие ответвления не влияет на чувствительность первой ступени линейных защит *А* и *В*.

На чувствительность линейных защит нулевой последовательности (*А* и *В*) оказывает влияние состояние нейтрали *Н* трансформаторов, подключенных к ответвлению (рис. 14-12). Если нейтраль *Н* не заземлена, то ток $3I_{0н}$, проходящий в месте к. з. (в точке K_4), распределяется между концами линии (*А* и *В*) обратно пропорционально сопротивлениям нулевой последовательности обеих ветвей.

При заземлении нейтрали *Н* и к. з. в K_4 часть тока $3I_{0н}$ замыкается через нейтраль ответвления, вследствие чего токи $3I_{0А}$ и $3I_{0В}$ на концах линии уменьшаются. Степень уменьшения зависит от соотношения параметров сети, линии и трансформатора ответвления. Для повышения чувствительности защиты на линиях с ответвлениями трансформатор ответвления желательно не заземлять.

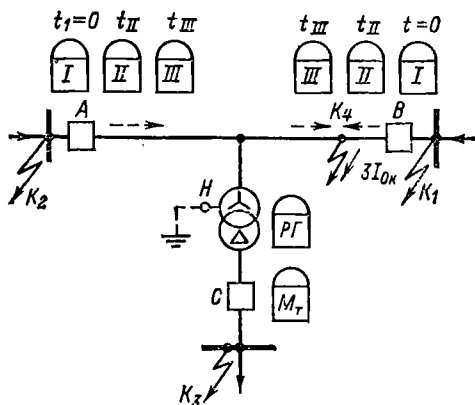


Рис. 14-12. Токовые и дистанционные защиты на линиях с ответвлениями.

Дистанционные защиты. По соображениям селективности первая зона защиты отстраивается от к. з. за трансформатором ответвления (точка K_3 на рис. 14-12), а вторая и третья — согласуются по времени с соответствующими защитами трансформатора ответвления (см. § 11-18).

в) Дифференциальные защиты

Поперечная направленная дифференциальная защита может устанавливаться на параллельных линиях с ответвлениями, но при этом необходимо учитывать два обстоятельства:

1. Наличие ответвлений нарушает равенство токов в параллельных линиях L_1 и L_2 в нормальном режиме, $I_1 \neq I_2$ (рис. 14-13, а), поэтому в реле появляется ток

$$I_p = I_1 - I_2 = I_{отв1} - I_{отв2}. \quad (14-3)$$

2. При к. з. за трансформатором ответвления защита приходит в действие, стремясь отключить линию с поврежденным ответвлением, что следует из токораспределения на рис. 14-13, б.

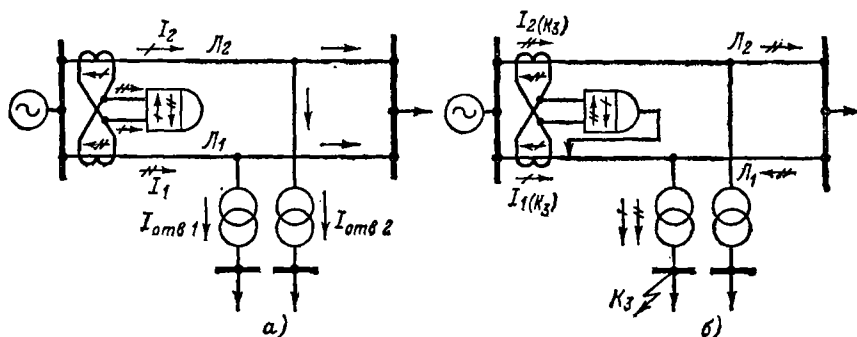


Рис. 14-13. Направленная поперечная дифференциальная защита параллельных линий с ответвлениями.

Для предупреждения неправильного действия поперечной дифференциальной защиты в нормальном режиме ее ток срабатывания отстраивается от тока небаланса, обусловленного нагрузкой ответвлений:

$$I_{с.з} = k_H (I_{отв1} - I_{отв2}). \quad (14-4)$$

Для исключения работы защиты во втором случае, при к. з. на ответвлении, необходимо выполнить условие:

$$I_{с.з} = k_H (I_1(K_3) - I_2(K_3)), \quad (14-5)$$

где $I_1(K_3)$ и $I_2(K_3)$ — токи к. з., проходящие по L_1 и L_2 в месте установки защиты при к. з. в K_3 за одним из трансформаторов ответвления.

При наличии источников питания на ответвлениях появляется возможность неправильной работы поперечной дифференциальной защиты при к. з. вне параллельных линий, в чем можно убедиться из рассмотрения токораспределения в $\mathcal{L}_1$ и $\mathcal{L}_2$. Исключение этого недостатка возможно только отстройкой тока срабатывания защиты.

Продольная дифференциальная защита. На линиях с ответвлением эта защита может неправильно действовать при к. з. за трансформатором ответвления (в точке K_3).

Как следует из рис. 14-14, токи по концам защищаемой линии в этом случае направлены от шин в линию (к месту к. з.), так же как и при к. з. на линии. Для исключения неправильной работы защиты ток срабатывания дифференциальных реле должен быть больше тока в них при к. з. в K_3 , т. е. $I_{с.з.} > I_{K_3}$. Это условие

можно выполнить только при маломощном трансформаторе ответвления, когда ток к. з. I_{K_3} имеет небольшую величину. Поэтому продольная дифференциальная защита типа ДЗЛ в большинстве случаев оказывается неприменимой на линиях с ответвлениями. Для линий с ответвлениями необходима особая схема защиты, реагирующая на геометрическую сумму токов на концах линии и в ответвлении. Такие защиты еще находятся в стадии разработки.

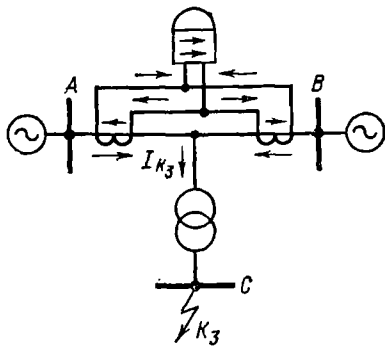


Рис. 14-14. Продольная дифференциальная защита на линии с ответвлением.

г) Высокочастотные защиты [Л.91]

Дифференциально-фазная защита. На линиях с ответвлением дифференциально-фазная защита, основанная на сравнении фаз токов I_A и I_B по концам линии (рис. 14-15, а), действует неправильно при к. з. в точке K_3 за трансформатором ответвления.

В этом случае токи по концам линии I_A и I_B совпадают по фазе, поэтому высокочастотные импульсы имеют прерывистый характер (рис. 14-15, б) и защита работает, так же как и при повреждении на защищаемой линии.

Неправильное действие защиты в рассматриваемом случае можно предотвратить двумя способами: 1) отстройкой пусковых реле, управляющих цепью отключения защиты, от к. з. за трансформатором ответвления или применением блокирующих реле, такие отстроенных от к. з. за трансформатором [Л. 64] и 2) установкой дополнительного неполного комплекта дифференциально-фазной защиты на ответвлении.

В первом случае при к. з. за трансформатором отвлечения пусковые реле в цепи отключения защиты, установленной на обоих концах линии, не будут срабатывать и поэтому защита не сможет подействовать на отключение.

Отстройка пусковых реле от к. з. за трансформатором ведется в режиме, когда линия отключена на противоположной стороне, так как в этом случае токи к. з. и их симметричные составляющие в рассматриваемом комплекте защиты будут наибольшими.

Данный способ применим при условии, что коэффициент чувствительности пусковых реле при к. з. на ответвлении (точка K_4) и на противоположной стороне линии (точка K_2) будет достаточным для надежной работы защиты (т. е. если $k_{\text{ч}} \geq 2$).

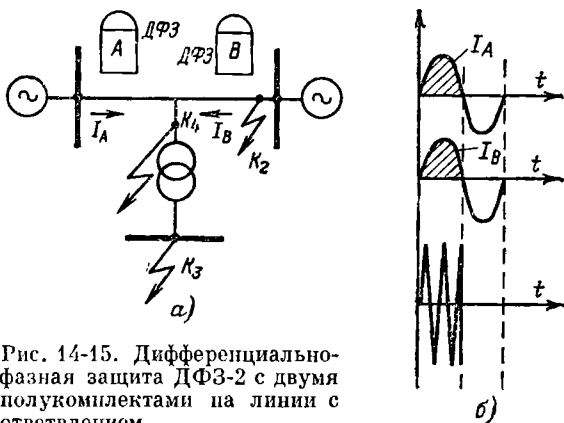


Рис. 14-15. Дифференциально-фазная защита ДФЗ-2 с двумя полукомплектами на линии с ответвлением.

Второй способ применяется, если отстройка пусковых органов защиты по условиям ее чувствительности невозможна.

В этом случае на ответвлении устанавливается дополнительный неполный комплект C дифференциально-фазной защиты (рис. 14-16), используемый для блокирования комплектов A и B , при повреждениях за трансформатором отвлечения, установленных на концах линии. Этот комплект C состоит из высокочастотного передатчика, пускающих его пусковых реле (рис. 14-16, в) и блока манипуляции, управляющего работой передатчика (см. рис. 12-21).

При к. з. за трансформатором отвлечения ток в ответвлении I_C сдвинут по фазе на 180° относительно токов I_A и I_B на концах линии (рис. 14-16, а).

В этих условиях передатчики на концах линии работают в положительные полупериоды токов I_A и I_B , а передатчик на ответвлении — в отрицательный полупериод этих токов. Ток высокой частоты генерируется непрерывно, как и при внешнем к. з., защита ДФЗ не работает (рис. 14-16, б).

В случае наличия источников питания со стороны ответвления на последнем устанавливается полный комплект дифференциально-фазной защиты. Рассмотрев распределение токов по концам линии и на ответвлении, нетрудно убедиться, что дифференциально-фазная защита, состоящая из трех полных комплектов, будет работать правильно при всех случаях повреждений. Готовится к выпуску фильтровая, в. ч. защита типа НФЗО для линий 110—330 кВ с ответвлениями.

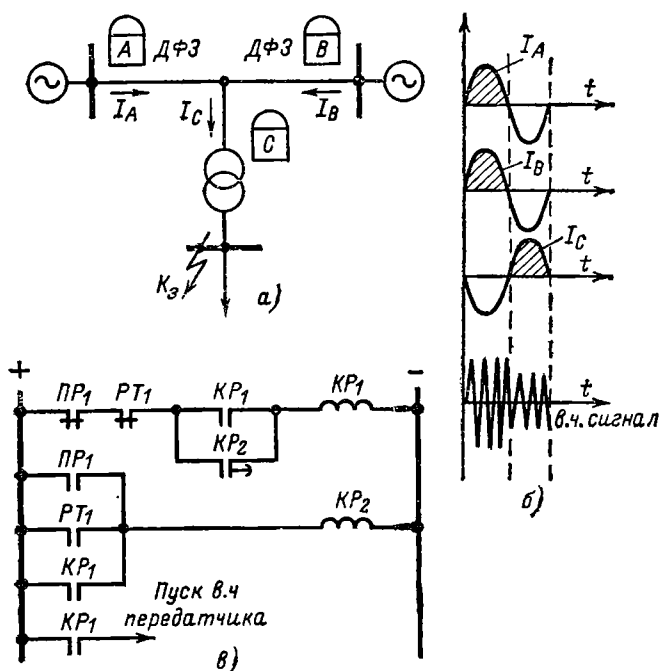


Рис. 14-16. Дифференциально-фазная высокочастотная защита ДФЗ-2 с тремя полуккомплектами на линии с ответвлением.

Направленные защиты с высокочастотной блокировкой. Для обеспечения правильной работы защиты в общем случае (при наличии питания со стороны ответвления) необходимо устанавливать комплекты защиты с трех сторон линии *A*, *B* и *C* (рис. 14-17).

При к. з. за трансформатором ответвления в точке K_3 мощность к. з. S_C на ответвлении направлена к шинам (рис. 14-17), комплект *C* пускает в. ч. передатчик, который посылает блокирующие импульсы, запрещающие работать комплектам *A* и *B*. При к. з. на линии последняя будет отключаться с трех сторон комплектами защиты *A*, *B* и *C*.

При отсутствии источников питания со стороны ответвления на последнем достаточно установить только в. ч. передатчик и пускающие его пусковые реле (рис. 14-18), с тем чтобы комплект *С* блокировал защиты *А* и *В* при к. з. за ответвлением в точке K_3 .

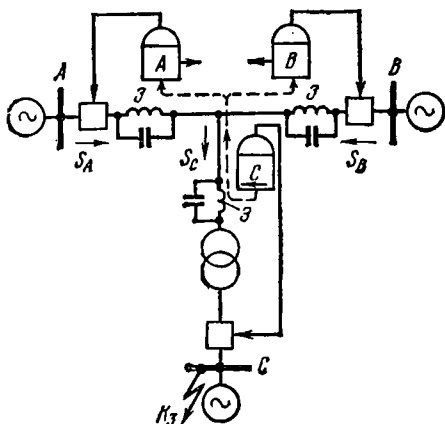


Рис. 14-17. Направленная высокочастотная защита на линии с ответвлением.

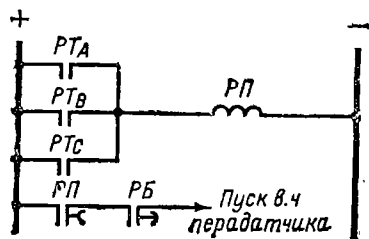


Рис. 14-18. Схема полуконспекта высокочастотной защиты, устанавливаемого на ответвлении без источника питания.

Комплект *С* можно не ставить, если пусковые реле защит *А* и *В* можно отстроить от к. з. в точке K_3 без ущерба для чувствительности защиты при повреждении на защищаемой линии.

ГЛАВА ПЯТНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ

15-1. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ, ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ГЕНЕРАТОРОВ

а) Виды повреждений генераторов

Большинство повреждений генератора вызывается нарушением изоляции обмоток статора и ротора. Эти нарушения обычно происходят вследствие старения изоляции, ее увлажнения, наличия в ней дефектов, а также в результате повышения напряжения, перенапряжений, механических повреждений, например из-за вибрации стержней обмоток и стали магнитопровода. Поэтому в принципе повреждения возможны в любой части обмоток.

Повреждения в статоре. В статоре возникают междуфазные (двухфазные и трехфазные) к. з., замыкание одной фазы на корпус (на землю), замыкание между витками обмотки одной фазы. Наиболее часто происходят междуфазные к. з. и замыкания на корпус.

Междуфазные к. з. сопровождаются прохождением в месте повреждения очень больших токов (десятки тысяч ампер) и образованием электрической дуги, вызывающей выгорание изоляции и токоведущих частей обмоток, а иногда и стали магнитопровода статора.

Замыкание обмотки статора на корпус является замыканием на землю, так как корпус статора связан с землей. При этом ток повреждения проходит в землю всегда через сталь магнитопровода статора, выжигая ее. Повреждение стали требует длительного и сложного ремонта.

Замыкание витков одной фазы. В замкнувшихся накоротко витках протекает большой ток, разрушающий изоляцию обмоток. Этот вид повреждения часто переходит в замыкание на землю или в замыкание между фазами.

Защиты от междуфазных к. з. и витковых замыканий должны быть быстродействующими и настолько чувствительными, чтобы они могли действовать при повреждениях вблизи нулевой точки генераторов и при малом числе замкнувшихся витков в одной фазе.

Повреждения в роторе. Обмотка ротора генератора находится под невысоким напряжением (300—500 В), поэтому ее изоляция имеет значительно больший запас прочности, чем изоляция статорной обмотки. Однако из-за тяжелых механических условий работы обмотки ротора, вызываемых большой частотой вращения (1500—3000 об/мин), относительно часто наблюдаются случаи повреждения изоляции и замыкания обмотки ротора на корпус (т. е. на землю) в одной или двух точках.

Замыкание на корпус в одной точке обмотки ротора неопасно, так как ток в месте замыкания практически равен нулю и нормальная работа генератора не нарушается. Но при этом повышается вероятность возникновения опасного для генератора аварийного режима в случае появления второго замыкания на корпус в другой точке цепи возбуждения.

При двойных замыканиях часть витков обмотки ротора оказывается зашунтированной (см. рис. 15-35); сопротивление цепи ротора при этом уменьшается и в ней появляется повышенный ток. Этот ток перегревает обмотки ротора и питающего ее возбудителя, вызывает дальнейшие разрушения в месте повреждения и может вызвать горение изоляции ротора.

Кроме того, из-за нарушения симметрии магнитного потока в воздушном зазоре между ротором и статором, обусловленного замыканием части витков обмотки ротора, возникает сильная механическая вибрация, опасная для генератора. Особенно большая и опасная вибрация появляется при двойном замыкании на землю на гидрогенераторах и синхронных компенсаторах (СК), имеющих явнополюсные роторы. Поэтому на гидрогенераторах и крупных СК целесообразно устанавливать защиту, сигнализирующую первое замыкание на землю в роторе. При срабатывании этой защиты

гидрогенератор останавливают для устранения повреждения. Для турбогенераторов двойное замыкание менее опасно, поэтому турбогенераторы допускается оставлять в работе при первом замыкании в роторе. Специальной защиты от этого вида повреждения можно не ставить. Замыкание на землю в роторе обнаруживается при измерении его изоляции, проводимом периодически на работающем генераторе.

Однако на мощных турбогенераторах 300 мВт и более установка такой защиты, осуществляющей непрерывный контроль за изоляцией ротора, следует признать целесообразной.

На турбогенераторах при первом замыкании обмотки ротора на корпус устанавливается защита от двойного замыкания на землю.

На генераторах малой мощности защиту разрешается выполнять с действием на сигнал. На мощных генераторах 200 мВт и выше защита выполняется с действием на отключение.

б) Ненормальные режимы

Ненормальными режимами генератора считаются: опасное увеличение тока в статоре или роторе с в е р х н о м и н а л ь н о г о значения (с в е р х т о к и), несимметричная нагрузка фаз статора, опасное повышение напряжения на статоре, асинхронный и двигательный режимы работы генератора.

Рассмотрим кратко причины и характер ненормальных режимов.

Повышенные токи (сверхтоки) в генераторе возникают при внешних к. з. или перегрузках.

П р и в н е ш н и х к. з. в генераторе, питающем место повреждения, появляется ток к. з. $I_K > I_{ном.г.}$. Нормально такие к. з. ликвидируются защитой поврежденного элемента и неопасны для генератора.

Однако в случае отказа защиты или выключателя этого элемента ток к. з. в генераторе будет проходить длительно, нагревая его обмотки. Повышенный нагрев может привести к повреждению последних. Предупредить подобное повреждение можно только путем отключения генератора.

Для этой цели на генераторе должны предусматриваться защиты, реагирующие на внешние к. з. и резервирующие отказ защиты или выключателей смежных элементов.

П е р е г р у з к а г е н е р а т о р а обычно возникает в результате отключения или отделения части параллельно работающих генераторов системы; кратковременных толчков нагрузки, вызванных технологией производственных процессов у потребителей; самозапуска двигателей; форсировки возбуждения генератора; нарушения синхронизма; потери возбуждения у генератора и тому подобных причин.

Перегрузка, т. е. увеличение тока нагрузки в обмотках генератора с в е р х номинального значения $I_T > I_{ном.}$, так же как и

внешнее к. з., вызывает перегрев обмоток и может привести к порче изоляции, если ее температура превзойдет некоторое предельное значение $T_{\text{доп. макс}}$, опасное для изоляции.

При прохождении тока перегрузки температура изоляции достигает предельного значения через некоторое время $t_{\text{доп}}$, зависящее от величины тока I_r . Характер этой зависимости $t_{\text{доп}} = f(I_r/I_{\text{ном}})$ показан на рис. 15-1.

Допустимое время $t_{\text{доп}}$ для генераторов с косвенным охлаждением определяется по формуле $t_{\text{доп}} = \frac{150}{k^2 - 1}$, где k — кратность тока перегрузки к номинальному.

Для ограничения размеров и массы, снижения стоимости и уменьшения затрат дефицитных материалов мощные генераторы выполняются с повышенной магнитной индукцией в магнитопроводе машины, с повышенной плотностью тока в обмотках статора и ротора, пониженными термическими запасами и вследствие этого с более интенсивной (форсированной) системой охлаждения.

В качестве последней принята система непосредственного охлаждения обмоток, осуществляемая подачей охлаждающей среды (водорода, воды, масла) во внутреннюю полость проводников обмоток статора и ротора. Охлаждающая среда циркулирует по специальным каналам внутри проводников обмоток.

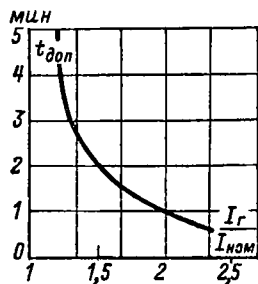


Рис. 15-1. Зависимость допустимой длительности перегрузки $t_{\text{доп}}$ от кратности тока генератора I_r к номинальному току $I_{\text{ном}}$.

Отечественные заводы выпускают генераторы:
 ТВФ — с непосредственным охлаждением ротора водородом;
 ТГВ — с непосредственным охлаждением водородом ротора и статора;
 ТВВ — с непосредственным охлаждением статора водой и ротора водородом;
 ТВМ — с непосредственным охлаждением статора маслом, а ротора водой.

Допустимое время перегрузки мощных генераторов зависит от типа охлаждения, соответствующие данные для обмоток статора приведены в табл. 15-1 и для обмоток ротора — в табл. 15-2 [Л. 100].

Как следует из таблиц, перегрузка статора до 30% на генераторах с непосредственным охлаждением и до 50% на генераторах с косвенным охлаждением допускается в течение 2 мин и более, поэтому при таких перегрузках не требуется немедленного автоматического отключения генератора.

Продолжительность перегрузки, $t_{\text{доп}}$, мин	Кратность перегрузки статора $\frac{I_{\text{ст}}}{I_{\text{ст.ном}}}$			Продолжительность перегрузки, мин	Кратность перегрузки статора $\frac{I_{\text{ст}}}{I_{\text{ст.ном}}}$		
	с косвенным охлаждением обмоток	с непосредственным охлаждением обмоток			с косвенным охлаждением обмоток	с непосредственным охлаждением обмоток	
		водой	водородом			водой	водородом
60	1,1	1,1	—	4	1,3	1,3	1,2
15	1,15	1,15	—	3	1,4	1,35	1,25
10	—	—	1,1	2	1,5	1,4	1,3
6	1,2	1,2	1,15	1	2,0	1,5	1,5
5	1,25	1,25	—				

Во многих случаях перегрузки, обусловленные форсировкой возбуждения, синхронными качаниями, кратковременными толчками нагрузки у потребителя и т. п., ликвидируются сами по себе до истечения предельного времени $t_{\text{доп}}$. При авариях в системе с дефицитом генераторной мощности предусматривается автоматическая разгрузка путем отключения части потребителей при снижении частоты, а также автоматический и ручной ввод резерва активных и реактивных мощностей. Такими путями предупреждается и ликвидируется длительная перегрузка генераторов при недостатке генераторной мощности.

Таблица 15-2

Продолжительность перегрузки ротора с непосредственным охлаждением, мин	Кратность перегрузки ротора $\frac{I_{\text{рот}}}{I_{\text{рот. ном}}}$
60	1,05
10	1,1
6	1,15
4	1,2
1	1,5
0,3	2

Отключение генераторов при перегрузках допускается только в тех случаях, когда принятые меры по их разгрузке не дают результата, а допустимое время перегрузки истекло.

С учетом сказанного защита от перегрузки генераторов на электростанциях с дежурным персоналом устанавливается с действием на сигнал. На автоматизированных электростанциях защита от перегрузки выполняется с действием на отключение или разгрузку генераторов по истечении допустимого времени перегрузки. Аналогичное исполнение защиты желательно иметь и на мощных генераторах, так как на этих генераторах при перегрузках, превышающих 30 %, $t_{\text{доп}}$ достаточно мало и дежурный персонал не успеет произвести своевременную разгрузку их.

Несимметрия токов в фазах генераторов возникает при двухфазных и однофазных к. з. вне генератора, при обрывах одной или

двух фаз цепи, связывающей генератор с нагрузкой, и при неполнофазном режиме работы в сети. Несимметрия токов приводит к дополнительному нагреванию ротора и механической вибрации машины.

Несимметрия сопровождается появлением в обмотке статора токов обратной последовательности I_2 , эти токи имеют обратное чередование фаз и создают магнитное поле, вращающееся в сторону, противоположную вращению ротора. В результате этого поток, созданный токами I_2 , пересекает корпус ротора с двойной скоростью. Он индуцирует в металлических частях ротора (в бочке ротора) значительные вихревые токи, имеющие двойную частоту, и создает дополнительный, пульсирующий с двойной частотой электромагнитный момент. Вихревые токи вызывают повышенный нагрев ротора, а пульсирующий момент — вибрацию вращающейся части машины.

Несимметрия токов особенно опасна для крупных современных турбо- и гидрогенераторов ТВФ, ТВВ, ТГВ, ТБМ, выполняемых, как указывалось выше, с пониженным тепловым запасом. С учетом термических и механических характеристик отечественных генераторов допускается их длительная работа с неравенством (несимметрией) токов по фазам, не превышающим 10% для турбогенераторов и 20% для гидрогенераторов и синхронных компенсаторов, при условии, что ток в фазах не превосходит номинального значения.

При указанной несимметрии ток I_2 составляет около 5 и 10% $I_{\text{ном.г.}}$ соответственно, эти значения являются максимальными длительно допустимыми токами $I_{2\text{макс.длит.доп}}$ и их можно рассматривать как номинальные (предельные) токи обратной последовательности генератора..

Ток $I_2 > I_{2\text{макс.длит.доп}}$ вызывает опасный дополнительный нагрев ротора и может допускаться лишь в течение ограниченного времени $t_{\text{доп}}$.

Величина допустимого времени $t_{\text{доп}}$ определяется предельной температурой $T_{\text{пред}}^{\circ}$, допустимой для изоляции обмотки ротора и отдельных, наиболее подверженных нагреву элементов ротора: бандажных колец, зубцов, металлических пазовых клиньев.

Непосредственно нагрев ротора происходит от тепла, выделенного вихревыми токами $I_{\text{в.т.}}$, возникающими в корпусе ротора, но так как последние индуцируются токами статора I_2 и ему пропорциональны $I_{\text{в.т.}} = kI_2$, то количество тепла, выделенное вихревыми токами,

$$Q = k'I_{\text{в.т.}}^2 t = k''I_2^2 t.$$

При адиабатическом процессе нагрева (без отдачи в окружающую среду) предельные температуры $T_{\text{пред}}^{\circ}$ достигаются при определенном, постоянном для данного типа генератора количестве тепла $Q_{\text{пред}}$. Характеризуя эту величину постоянной A , получаем уравнение нагрева ротора в зависимости от значения тока I_2 :

$$I_{2*}^2 t_{\text{доп}} = A, \quad (15-1)$$

$$t_{\text{доп}} = \frac{A}{I_{2*}^2}, \quad (15-2)$$

где I_{2*} — кратность среднего за время $t_{\text{доп}}$ действующего значения тока I_2 к $I_{\text{ном.г}}$; A — тепловая постоянная, зависящая от типа генератора.

В общем случае ток I_2 непостоянен и может изменяться в течение времени $t_{\text{доп}}$. Под средним током I_2 понимается действующее значение тока I_2 , сохраняющего постоянную величину в течение времени $t_{\text{доп}}$ и выделяющего за это время такое же количество тепла, что и действительный изменяющийся в это время ток $I_{2(t)}$.

Величина среднеквадратичного тока I_{2*} находится интегрированием (суммированием) мгновенных квадратичных значений токов i_{2*}^2 в пределах времени $t_{\text{доп}}$, делением полученного интеграла на время $t_{\text{доп}}$ и извлечением из полученного выражения квадратного корня:

$$I_{2*} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{доп}}} \int_0^{t_{\text{доп}}} i_{2*}^2 dt}, \quad (15-3)$$

где i_{2*} — мгновенное значение действительного тока I_2 в относительных единицах.

Выражение (15-2) является тепловой характеристикой ротора генератора, определяющей допустимую продолжительность несимметричных режимов в зависимости от величины тока I_2 : $t_{\text{доп}} = f(I_2)$.

Это выражение является приближенным. При малых токах нагрев ротора происходит медленно и сопровождается отдачей тепла в окружающую среду (т. е. не адиабатически), в результате чего действительное $t_{\text{доп}}$ больше расчетного.

При прохождении больших токов возникает опасность выделения повышенного количества тепла в переходном сопротивлении соприкасающихся поверхностей стали ротора (зубцов, клиньев и др.). Последнее может приводить к более быстрому нагреву этих поверхностей до опасной температуры, чем это дается расчетной формулой (15-2).

Тепловые характеристики для генераторов разного типа и разной мощности приведены на рис. 15-2 и в табл. 15-3. Постоянная A принята по данным заводов. Для генераторов с косвенным водородным охлаждением $A = 30$, для генераторов ТВФ $A = 15$, для генераторов ТГВ, ТВВ и ТВМ $A = 11 \div 8$. Для турбогенераторов 500 МВт $A = 5$.

Из характеристик на рис. 15-2 видно, что для мощных генераторов с непосредственным охлаждением при $I_{2*} = 0,3 I_{\text{ном.г}}$ время $t_{\text{доп}}$ относительно мало (меньше 2 мин), поэтому при подобных

перегрузках требуются автоматические устройства, защищающие генераторы при несимметричных режимах.

У генераторов меньшей мощности, 30—60 МВт, с косвенным охлаждением и большими запасами по нагреву роторов (кривые 1 и 2) допустимое время значительно больше и автоматическое отключение для них требуется лишь при токах $I_2 > 0,5I_{\text{ном.г.}}$.

Повышение напряжения возникает на генераторах при внезапном сбросе нагрузки, так как при этом исчезает магнитный поток реакции статора и увеличивается частота вращения разгрузившейся машины.

На турбогенераторах повышение напряжения не достигает опасных значений и ликвидируется автоматическими регуляторами скорости и возбуждения или в случае отсутствия последнего — ручным регулированием возбуждения. При увеличении частоты вращения до 110% на турбогенераторах срабатывает «автомат безопасности», полностью закрывающий доступ пара в турбину, что исключает чрезмерное увеличение частоты вращения и опасное повышение напряжения.

На гидрогенераторах регуляторы скорости действуют медленнее, чем на турбогенераторах, в результате этого при сбросе нагрузки частота вращения агрегата резко увеличивается и может превысить номинальную на 40—60%, а напряжение генератора вследствие этого может возрасти до 150% номинального и больше. Поэтому на гидрогенераторах наряду с автоматическим устройством развозбуждения предусматривается защита от повышения напряжения, действующая на снятие возбуждения или отключение генератора.

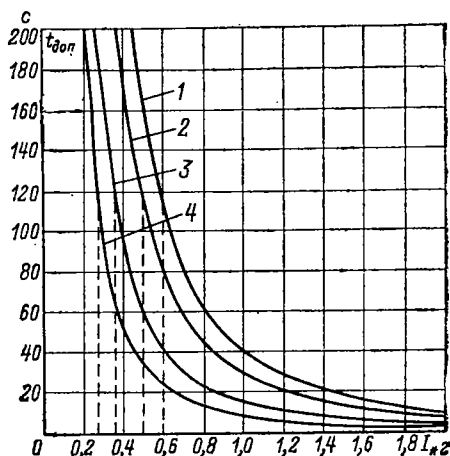


Рис. 15-2. Кривые зависимости $t_{\text{доп}} = f(I_{*2})$.

1 — для гидрогенераторов ($A = 40$); 2 — для турбогенераторов ТВ2 ($A = 29$); 3 — для турбогенераторов ТВФ ($A = 15$); 4 — для турбогенераторов ТГВ-300 ($A = 8,5$).

Таблица 15-3

Продолжительность несимметричного режима, с	Допустимый ток I_2 в долях номинального для турбогенераторов	
	ТВФ	ТВВ и ТГВ
2	2,6	2,0
3	2,3	1,6
4	1,9	1,4
5	1,7	1,25
10	1,2	0,9
20	0,9	—

Асинхронный режим возникает при потере возбуждения, из-за отключения АГП и по любой другой причине. Асинхронный режим сопровождается потреблением из сети значительного реактивного

тока, понижением напряжения на зажимах генератора, увеличением оборотов ротора и в общем случае качаниями. Турбогенераторы могут работать в асинхронном режиме с некоторым скольжением как асинхронный генератор, при условии снижения активной нагрузки. Благодаря повышенным значениям тока работа генератора в асинхронном режиме ограничена по времени в зависимости от его конструкции и термических характеристик. Генераторы с косвенным охлаждением могут работать без возбуждения с нагрузкой до 60% номинальной. Генераторы с непосредственным охлаждением имеют меньшие термические запасы и могут работать, в асинхронном режиме с нагрузкой не более 40%. Гидрогенераторы, имеющие ротор с явно выраженными полюсами, при потере возбуждения не могут оставаться в работе, и их необходимо отключать. На турбогенераторах целесообразно предусматривать защиту, реагирующую на потерю возбуждения, действующую на снижение активной нагрузки до величины, обеспечивающей устойчивую работу генератора. На гидрогенераторах следует применять такую же защиту с действием на отключение. Достаточно совершенных и общепризнанных защит, реагирующих на потерю возбуждения, пока еще не разработано. В зарубежной практике применяются реле реактивной мощности и направленные реле реактивного сопротивления. По принципу действия эти реле могут работать ложно при качаниях, по этой причине они не получили применения в СССР.

в) Общие требования к защите генераторов

На генераторах устанавливаются защиты от внутренних повреждений и опасных ненормальных режимов, т. е. таких режимов, которые могут вызывать повреждение генератора.

При ненормальных режимах работы генератора, не требующих немедленного отключения, защита, как правило, должна действовать на сигнал, по которому дежурный обязан принять меры к устранению ненормального режима без отключения генератора.

Автоматическое отключение генератора допускается только в тех случаях, когда возникший ненормальный режим нельзя устранить, а его дальнейшее продолжение ведет к повреждению генератора.

Для предотвращения развития повреждения, возникшего в генераторе, защиты от внутренних повреждений должны отделить генератор от сети, отключив главный выключатель, и прекратить ток в обмотке ротора отключением автомата гашения поля (рис. 15-3). С отключением выключателя прекращается ток повреждения I_n , поступающий в поврежденный генератор из сети (рис. 15-3). Однако через место повреждения продолжает проходить ток $I'_{кз}$, поддерживаемый э. д. с. генератора E . Отключением АГП 1 разрывается цепь тока ротора $I_{рот}$. В результате этого исчезает поток ротора и вместе с ним исчезает создаваемая им в фазах генератора э. д. с. Одновременно блок-контакт АГП 2 воздействует на отклю-

чение АГП возбуждателя, контакт которого $\mathcal{Z}$ вводит сопротивление $R_{АГП}$ в цепь возбуждения возбуждателя. Кроме того, в генераторах с воздушным охлаждением для тушения пожара изоляции в камеру генератора пускается от руки пар или вода либо автоматически углекислота CO_2 от защит, действующих при внутренних повреждениях. На генераторах с водородным охлаждением специальных мер по тушению пожара в генераторе не применяется, поскольку водород не поддерживает горения. На генераторах, охлаждаемых маслом, необходимы устройства для тушения пожара, но такие устройства находятся еще в стадии разработки.

Защиты от внешних коротких замыканий должны отключать генераторный выключатель для прекращения тока к. з., посылаемого генератором в сеть, и АГП для предупреждения повышения напряжения на зажимах генератора вследствие сброса нагрузки.

15-2. ЗАЩИТА ОТ МЕЖДУФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА

а) Назначение и общие принципы выполнения защиты

В качестве основной защиты от междуфазных коротких замыканий в генераторе применяется быстродействующая продольная дифференциальная защита (см. § 10-2).

Схема продольной дифференциальной защиты для одной фазы генератора показана на рис. 15-4, а. Полные схемы приведены на рис. 15-10 и 15-11.

Принцип действия защиты (рис. 15-4, а) основан на сравнении величин и фаз токов (I_I и I_{II}) в начале и конце обмотки фазы статора. С этой целью с обеих сторон обмотки статора устанавливаются трансформаторы тока TI и TII с одинаковыми коэффициентами трансформации $n_{TI} = n_{TII}$. Их вторичные обмотки соединяются последовательно, как показано на чертеже, разноименными полярностями. Дифференциальное реле P включается параллельно вторичным обмоткам обоих трансформаторов тока.

П р и к. з. в н е з о н ы (точка K_1 на рис. 15-4, а) первичные токи I_I и I_{II} равны по величине и направлены в одну сторону (к

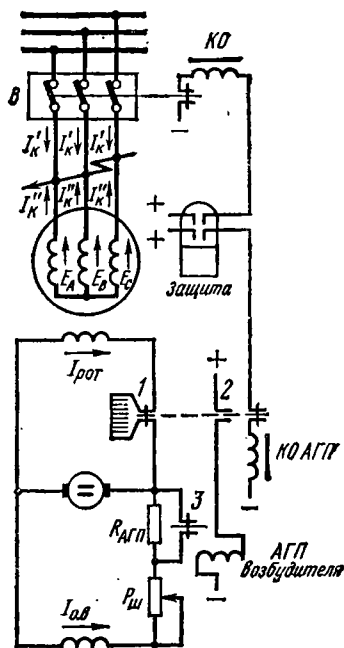


Рис. 15-3. Схема автоматического гашения поля генератора.

месту к. з.). Распределение вторичных токов показано на рис. 15-4, а, ток в реле $I_p = I_{IВ} - I_{IIВ}$, при идеальной работе трансформаторов тока $I_{IВ} = I_{IIВ}$ и поэтому $I_p = 0$ — защита не работает. В действительности из-за погрешности трансформаторов тока $I_{IВ} \neq I_{IIВ}$ и в реле появляется ток небаланса $I_p = I_{нб} = I_{IВ} - I_{IIВ}$. Для исключения ложной работы защиты необходимо обеспечить условие

$$I_{с.з} > I_{нб. макс.}$$

При нагрузке распределение первичных и вторичных токов соответствует условиям внешнего к. з., ток $I_p = 0$ и защита не действует.

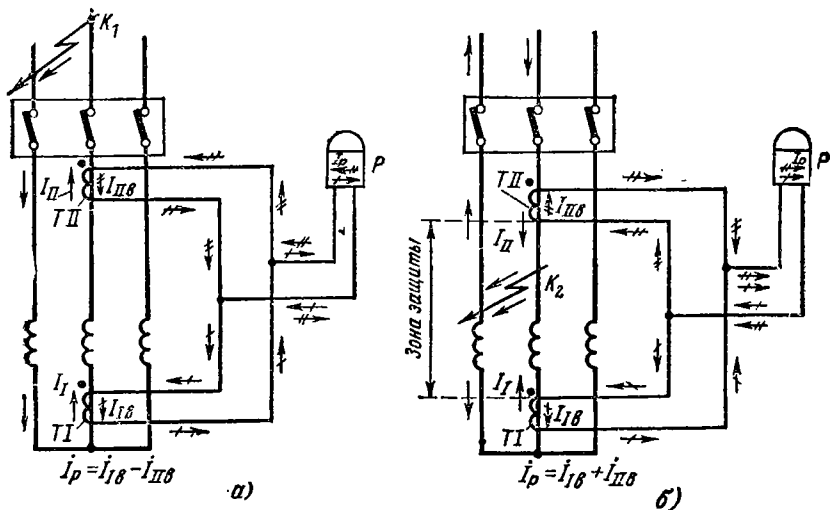


Рис. 15-4. Схема и принцип действия продольной дифференциальной защиты генератора.

а — токраспределение при внешнем к. з.; б — при к. з. в зоне.

При к. з. в зоне (точка K_2 на рис. 15-4, б) первичные токи к. з. на обеих сторонах обмотки направлены встречно (к месту к. з.). В результате этого вторичные токи в реле суммируются $I_p = I_{IВ} + I_{IIВ}$ и реле приходит в действие, если $I_p > I_{с.з.}$. Для прекращения к. з. защита должна отключить генераторный выключатель и АГП.

Трехфазные и двухфазные защиты. Поскольку дифференциальная защита генераторов, как это уже отмечалось, предназначена для действия при междуфазных к. з., она может выполняться по двухфазной схеме. Однако двухфазная защита не может обеспечить отключение генератора при двойных замыканиях на землю (рис. 15-5), если одно из замыканий K_1 возникло в сети (на фазе А или В, имеющей дифференциальную защиту), а второе —

в точке K_2 на фазе B генератора, не имеющей защиты. Как видно из токораспределения, показанного на рис. 15-5, a , ток к. з., проходящий по фазе A к месту повреждения (к точке K_1), является сквозным, поэтому в дифференциальном реле этой фазы ток $I_p = 0$ и реле P_A не действует. На фазе B , где возникло повреждение генератора, защита могла бы работать, но она на этой фазе не установлена. Таким образом, в рассмотренном случае двухфазная защита не действует, хотя двойное замыкание на землю является опасным видом повреждения для генератора и требует быстрого отключения, так как возникающий при этом ток к. з. имеет большую величину и проходит в землю через сталь статора, причиняя значительные разрушения.

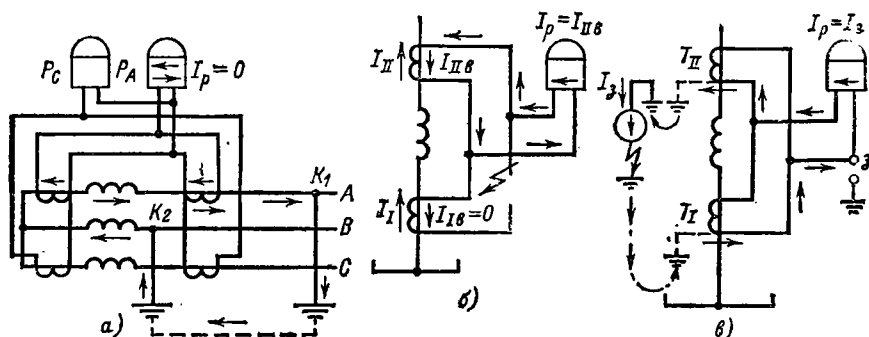


Рис. 15-5. Токораспределение.

a — при двойном замыкании на землю; $б$ — при обрыве соединительного провода; $в$ — при заземлении каждой группы трансформаторов тока (T_I и T_{II}) дифференциальной защиты.

Для быстрого отключения такого повреждения дифференциальная защита генератора должна выполняться трехфазной. В целях экономии трансформаторов тока дифференциальные защиты генератора можно выполнять двухфазными, предусматривая при этом соответствующее исполнение защиты от замыкания на землю, позволяющее ей отключать двойные замыкания на землю (см. § 15-4). На генераторах 100 тыс. кВт и больше по соображениям повышения надежности их защиты целесообразно применять трехфазные схемы дифференциальных защит при всех условиях.

Зона действия защиты ограничивается участком, расположенным между трансформаторами тока T_I и T_{III} (рис. 15-4). При выполнении защиты стремятся по возможности расширить ее зону; с этой целью трансформаторы тока T_{III} обычно устанавливаются непосредственно у выключателя, так чтобы повреждения на всех токоведущих частях от выводов генератора до выключателя отключались мгновенно дифференциальной защитой.

Обрыв соединительного провода в схеме дифференциальной защиты нарушает баланс токов в реле и вызы-

вает неправильную работу защиты при сквозных к. з. или даже в нормальном режиме (рис. 15-5, б). Поэтому токовые цепи защиты должны выполняться с особой надежностью. Число контактных соединений в токовых цепях должно быть минимальным, а качество соединений — надежным.

Вторичные обмотки трансформаторов тока а дифференциальной защиты заземляются только у одной группы трансформаторов TI или TII ; вторая группа трансформаторов тока электрически связана с первой и поэтому своего заземления не имеет. При заземлении обеих групп трансформаторов образуется цепь, по которой могут проходить токи, появляющиеся в контуре заземления подстанции, в результате чего возможно неправильное действие защиты (рис. 15-5, в). Обычно устанавливается одно заземление в точке з.

б) Ток небаланса

При внешних к. з. в дифференциальном реле P (рис. 15-4) появляется ток небаланса, обусловленный погрешностями трансформаторов тока TI и TII ; как было показано в § 10-4:

$$I_{нб} = I_{I\text{нам}} - I_{I\text{нам}}. \quad (15-4)$$

Ток небаланса может вызвать неправильную работу дифференциальной защиты, поэтому принимаются меры к ограничению его величины.

Для этой цели необходимо соблюдать следующие требования:

а) Трансформаторы тока не должны насыщаться при токах сквозного к. з., что позволяет уменьшить токи намагничивания, а следовательно, и ток небаланса при внешних к. з. Это обеспечивается применением трансформаторов тока, насыщающихся при возможно больших значениях вторичной э. д. с. E_2 , и уменьшением сопротивления плеч защиты, составляющих нагрузку трансформаторов тока при внешних к. з., от которой зависит величина E_2 (рис. 15-6).

Поставленным требованиям наилучшим образом удовлетворяют трансформаторы тока класса P и D , которые обычно и применяются для дифференциальных защит генераторов.

Уменьшение сопротивления плеч достигается выбором сечения жил соединительного кабеля. Допустимое сопротивление соединительных проводов находится из условия 10% - н о й п о г р е ш н о с т и трансформаторов тока (по кривым предельной кратности).

б) Для уменьшения разности намагничивающих токов характеристики намагничивания $E_2 = f(I_{\text{нам}})$ трансформаторов тока TI и TII должны быть идентичными (совпадающими), а сопротивления плеч — по возможности равными. При этих условиях разность $I_{I\text{нам}} - I_{I\text{нам}}$ будет минимальной (рис. 15-6).

Выполнение указанных требований весьма существенно ограничивает установившееся значение тока небаланса. Однако первоначальный бросок тока небаланса, обусловленный апериодической составляющей тока при внешнем к. з. или самосинхронизации генератора, может достигать значительной величины.

В гл. 10 было показано, что начальный ток небаланса содержит значительную апериодическую составляющую, которая придает кривой небаланса несимметричный вид (рис. 10-7).

Для исключения работы дифференциальной защиты от тока небаланса в неустановившемся и установившемся режимах кроме

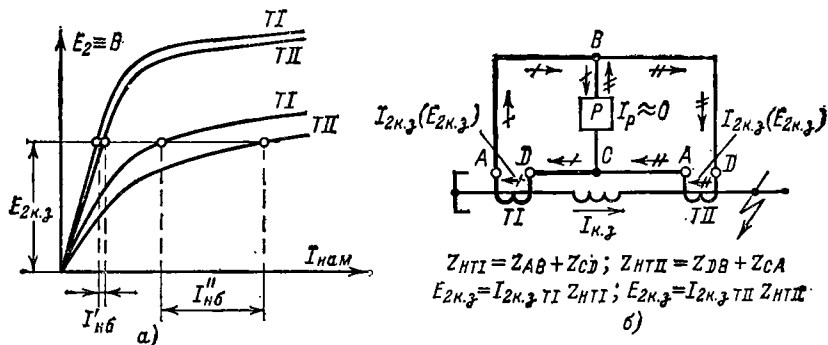


Рис. 15-6. Влияние характеристики трансформаторов тока на величину тока небаланса.

а — токи $I'_{нб}$ при идентичности характеристик намагничивания и отсутствии насыщения; $I''_{нб}$ при насыщении и неидентичных характеристиках; б — нагрузка на трансформаторы тока при внешнем к. з.

отмеченных выше мер по уменьшению разности намагничивающих токов (15-4) могут использоваться три способа:

1) уменьшение величины и продолжительности броска $I_{нб}$ в неустановившемся режиме;

2) применение реле, отстроенных от бросков $I_{нб}$, возникающих в этом режиме;

3) применение реле с торможением от тока сквозного к. з.

Уменьшение броска тока небаланса достигается с помощью активного сопротивления порядка 5 Ом, включаемого последовательно с обмотками дифференциальных реле (рис. 15-10, а). Активное сопротивление ограничивает величину $I_{нб}$ и, кроме того, уменьшает постоянную времени T_2 вторичного контура трансформаторов тока ($T_2 = L/r$). Однако включение значительного активного сопротивления (5 Ом) создает повышенную нагрузку на трансформаторы тока при к. з. в генераторе. В результате этого их погрешность увеличивается, а вторичный ток, поступающий в реле, уменьшается, что понижает чувствительность защиты и является недостатком, ограничивающим применение этого способа.

В качестве второго, более совершенного способа применяется отстройка от неустановившихся токов небаланса включением дифференциального реле через быстронасыщающийся трансформатор [Л. 66]. Этот метод получил широкое распространение в СССР.

Третий способ предусматривает использование в качестве дифференциальных реле — реле с торможением, автоматически заглубляющихся при внешнем к. з. одновременно с ростом тока небаланса. Реле подобного типа были рассмотрены в § 10-4.

в) Применение насыщающихся трансформаторов для отстройки от тока небаланса

Принцип работы БНТ. Эффективным и простым способом отстройки от аperiodической составляющей тока небаланса является включение дифференциальных реле через вспомогательные

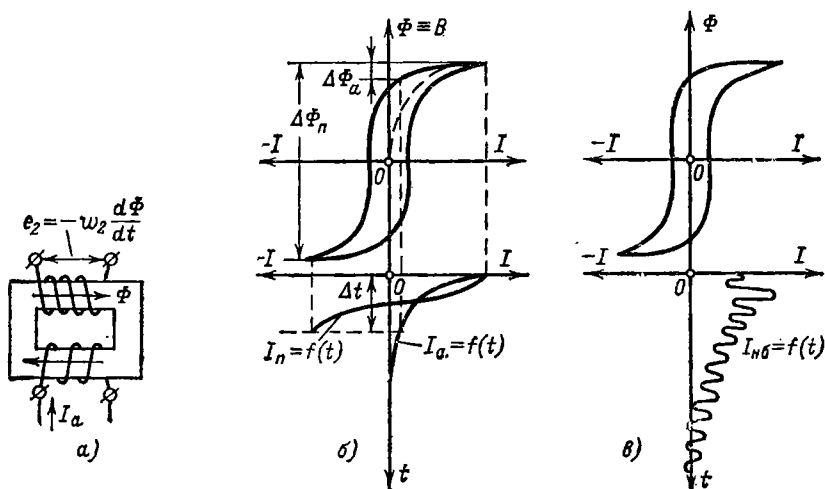


Рис. 15-7. Работа и характеристики быстронасыщающегося трансформатора (БНТ).

быстронасыщающиеся трансформаторы тока (БНТ), как показано на рис. 15-10, б. Параметры БНТ подбираются так, что он почти не трансформирует аperiodический ток, преобладающий в начальном токе небаланса, но достаточно хорошо пропускают синусоидальный ток, появившийся в реле при к. з. в зоне защиты.

Если представить, что в первичной обмотке БНТ проходит аperiodический ток $I_a = f(t)$ (рис. 15-7, а), то на зажимах разомкнутой вторичной обмотки БНТ (по закону индукции) будет наводиться э. д. с.

$$e_2 = - \frac{d\Phi}{dt}. \quad (15-5)$$

Как следует из кривой намагничивания БНТ (рис. 15-7, б), за некоторый весьма малый промежуток времени Δt изменению тока I_a соответствует ничтожное изменение потока Φ ; поэтому скорость изменения потока $\Delta\Phi_a$ $d\Phi/dt \approx 0$. В результате этого величина индуктируемой э. д. с. e_2 будет ничтожной. Следовательно, и ток во вторичной обмотке БНТ будет мал.

Синусоидальный ток I_n трансформируется на вторичную сторону БНТ значительно лучше. За то же время Δt (рис. 15-7, б) поток в магнитопроводе изменится весьма значительно — на $\Delta\Phi_n$. Это означает, что скорость изменения магнитного потока $d\Phi/dt$, определяющая e_2 , при питании БНТ синусоидальным током будет значительно больше, чем при питании его аperiodическим током.

Можно считать, что *практически аperiodическая составляющая тока небаланса не трансформируется во вторичную обмотку БНТ и полностью расходуется на подмагничивание его сердечника*. Это приводит к насыщению БНТ и ухудшению трансформации также и периодической составляющей I_n тока небаланса.

Таким образом, в реле попадает только периодическая составляющая тока небаланса, уменьшенная по величине за счет насыщения, обусловленного подмагничиванием сердечника аperiodическим током.

В установившемся режиме, когда аperiodическая составляющая в токе небаланса затухает, последний трансформируется в реле без существенных искажений по величине и форме кривой.

Параметры БНТ выбираются с таким расчетом, чтобы он насыщался при относительно небольших значениях аperiodического тока. Подбором стали магнитопровода БНТ с широкой петлей гистерезиса и величины индукции срабатывания $B_{с.р.}$, близкой к $B_{нас.}$, можно добиться таких условий, при которых начальный ток небаланса, смещенный асимметрично относительно оси времени (рис. 15-7, в), не будет трансформироваться через БНТ за счет палиция в нем большой аperiodической составляющей. На этом и основана отстройка от асимметричных токов небаланса дифференциальных реле при включении их через БНТ.

Добиваясь для отстройки от $I_{нб}$ насыщения сердечника БНТ при относительно малых токах необходимо обеспечить достаточную надежность действия реле БНТ при повреждениях в зоне защиты. Чтобы обеспечить это условие, вторичный ток БНТ при к. з. в зоне должен быть на 20—30% больше тока срабатывания реле. За минимальную величину тока к. з., при котором должна обеспечиваться надежная работа реле, принимается $I_{к.з. мин} = 2I_{с.р.1}$.

Характеристика БНТ $I_{2БНТ} = f(I_{1БНТ})$, удовлетворяющая этому условию, показана на рис. 15-8 (при первичном токе БНТ, равном $2I_{с.р.1}$, ток в реле равен $1,3I_{с.р.2}$).

Чебоксарский электроаппаратный завод выпускает реле РНТ-565 (рис. 15-9) для дифференциальной защиты генераторов и трансформаторов [Л. 65].

Реле РНТ состоит из трехстержневого быстро насыщающегося трансформатора (БНТ) и питающегося от него реле. Трансформатор имеет три первичные обмотки: w_d , w_{y1} , w_{y2} , одну вторичную w_2 и короткозамкнутую обмотку w_k .

Обмотки w_d и w_2 являются основными обмотками БНТ. Первая w_d включается в дифференциальную цепь защиты, вторая w_2 питает реле типа РТ-40/0,2.

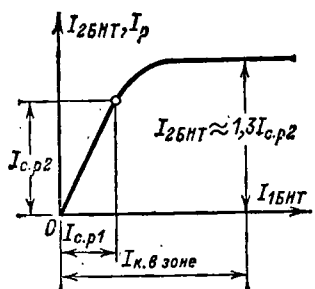


Рис. 15-8. Зависимость вторичного тока БНТ от первичного тока.

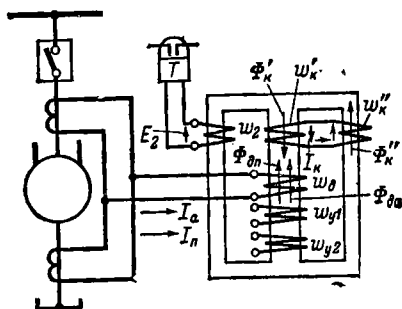


Рис. 15-9. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты генератора с реле РНТ-565.

Вспомогательные обмотки w_{y1} и w_{y2} , называемые у р а в н и т е л ь н ы м и, предназначены для компенсации неравенства вторичных токов I_I и I_{II} в плечах дифференциальных защит трансформаторов (рис. 16-3). В защите генератора они обычно не используются.

Ток срабатывания реле регулируется изменением числа витков дифференциальной обмотки w_d .

К о р о т к о з а м к н у т а я обмотка w_k позволяет усиливать или ослаблять (регулировать) подмагничивающее действие анериодического тока, поступающего в обмотку w_d [Л. 65, 68] (см. § 16-8, в).

г) Разновидности схем дифференциальных защит

На рис. 15-10 и 15-11 приведены три основные схемы дифференциальной защиты.

Первая схема (рис. 15-10, а) выполняется с помощью простых токовых реле типа РТ или ЭТ. Последовательно с ними включается сопротивление $r = 5 \div 10$ Ом, которое служит для уменьшения небаланса.

Для отстройки от тока небаланса ток срабатывания защиты при этой схеме приходится выбирать больше $I_{\text{ном.ген}}$. Защита получается малочувствительной, что является недостатком схемы.

Такие схемы применяются только для генераторов малой мощности. Из соображений экономии трансформаторов тока они обычно

выполняются двухфазными, при этом отключение двойных замыканий производится защитой от замыкания на землю.

Вторая, наиболее распространенная схема осуществляется с помощью реле РНТ-565. Она показана на рис. 15-10, б в трехфазном исполнении. В реле РНТ используется только дифференциальная обмотка w_d . Уравнительные обмотки остаются разомкнутыми и не используются. Насыщающий трансформатор БНТ,

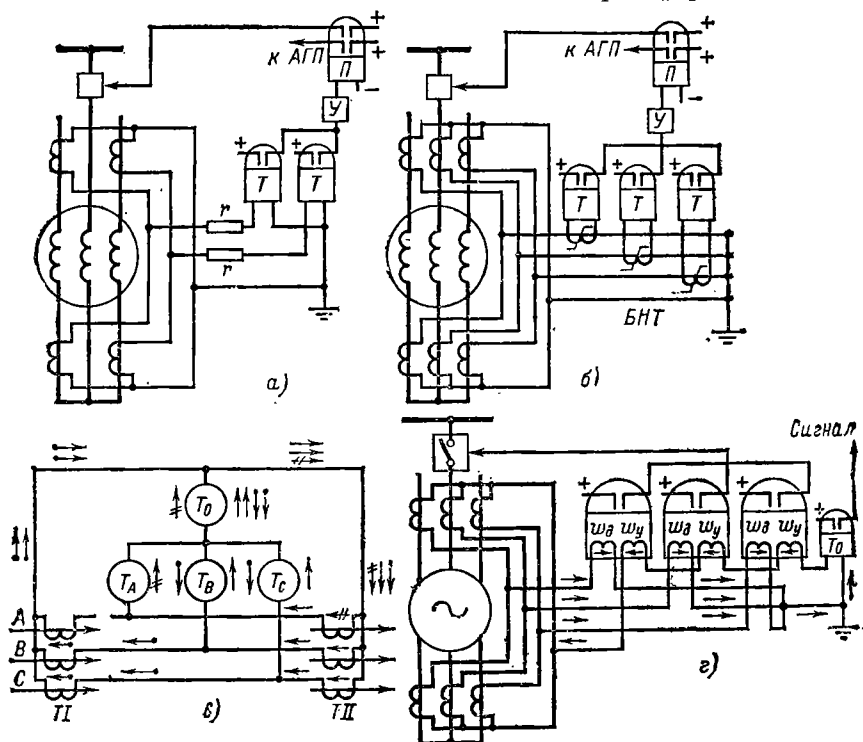


Рис. 15-10. Схемы продольной дифференциальной защиты генератора.

а — двухфазная с токовыми реле типа ЭТ или РТ; б — трехфазная с реле РНТ-565; в — прохождение токов во вторичных цепях при обрыве одного плеча; г — с повышенной чувствительностью с реле РНТ-562, не реагирующая на обрыв токовой цепи.

через который поступает ток в дифференциальную обмотку реле РНТ, не пропускает апериодической составляющей $I_{нб}$, и поэтому ток срабатывания защиты отстраивается только от периодической составляющей тока небаланса. Ток срабатывания защиты получается при этом равным $(0,5 \div 0,6) I_{ном.ген.}$ Защита с РНТ более чувствительна, чем с простым токовым реле. Схема с реле РНТ применяется на генераторах средней мощности 25—100 МВт.

При обрыве соединительного провода в одном плече токовой цепи защиты (например, фазы А от ТI) в реле T_A , как это следует из токораспределения на рис. 15-10, в,

появляется ток нагрузки от трансформатора тока *ТII* фазы *А*. Под воздействием этого тока защита может сработать при отсутствии повреждения в генераторе. В случаях, когда необходимо исключить подобную ложную работу защиты можно или загрубить защиту, выбирая $I_{с.з} > I_{ном.ген}$ на 20—30%, или применять особую схему включения реле РНТ [Л. 84] с использованием уравнильной обмотки w_y .

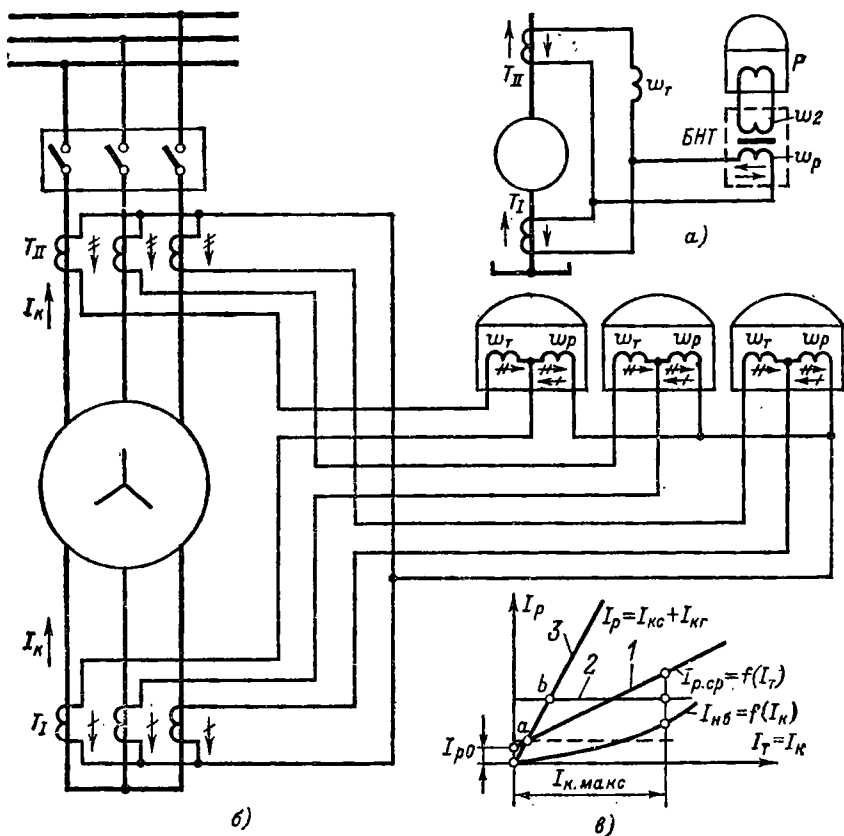


Рис. 15-11. Дифференциальная защита с включением реле через БНТ и торможением.

а — упрощенная однофазная схема; *б* — полная схема; *в* — характеристики срабатывания реле с торможением; w_p — рабочая обмотка БНТ; w_T — тормозная обмотка.

В этой схеме (рис. 15-10, *з*) дифференциальная обмотка каждого реле включается, как обычно, на разность токов, а одна из уравнильных обмоток — в нулевой провод дифференциальных реле. Обмотки w_d и w_y в каждом реле включаются встречно. При обрыве провода в плече защиты в реле этого плеча появляется ток нагрузки I_H в обеих обмотках w_d и w_y . Число витков подбирается так, чтобы разность н. с., создаваемых этими обмотками при токе I_H , $F_d - F_y$ была меньше н. с., необходимой для срабатывания реле. При соблюдении этого условия защита не будет действовать при обрыве

соединительных проводов. При трехфазных и двухфазных к. з. в зоне и вне зоны ток в нулевом проводе отсутствует, поэтому уравнительная обмотка w_u не влияет на работу защиты. При $w_d = 2w_u$ ток срабатывания защиты получается равным $0,55 I_{\text{ном.ген.}}$. При двойных замыканиях на землю ток срабатывания получается больше за счет влияния уравнительной обмотки. Для сигнализации о повреждении в токовой цепи в нулевой провод дифференциальной защиты включается чувствительное токовое реле с $I_{\text{с.р.}} \approx 0,2 I_{\text{ном.ген.}}$ (рис. 15-10, в). В нормальном режиме ток в реле отсутствует; при обрыве провода в реле появляется ток оборванной фазы, и оно подает сигнал.

Опыт эксплуатации показывает, что при надежном выполнении токовых цепей и хорошем уходе за ними их повреждение происходит очень редко. В связи с этим заглубление защиты или применение рассмотренной схемы, не реагирующей на обрыв токовой цепи, является излишним. Указанные мероприятия, исключающие ложное действие защиты при обрыве токовых цепей, целесообразны только на генераторах, отключение которых приводит к нарушению электроснабжения потребителей.

Третья схема наиболее совершенная, она сочетает два принципа отстройки защиты от тока небаланса: т о р м о ж е н и е, при котором ток $I_{\text{с.р.}}$ автоматически увеличивается с ростом тока к. з., и применение насыщающегося трансформатора БНТ для ограничения $I_{\text{нб}}$, поступающего в реле. В результате такого сочетания защита весьма надежно отстраивается от тока небаланса и обладает высокой чувствительностью — при к. з. в генераторе ток срабатывания защиты $I_{\text{с.з.}} \approx (0,1 + \div 0,3) I_{\text{ном.ген.}}$.

В качестве дифференциального реле в рассматриваемой схеме (рис. 15-11, а) применяется токовое реле с торможением от тока к. з. при внешних повреждениях. Реле имеет тормозную и рабочую обмотки. Реле P включается по дифференциальной схеме на разность токов трансформаторов тока II и III и через насыщающийся трансформатор (БНТ). Насыщающийся трансформатор состоит из первичной рабочей обмотки w_p и вторичной w_t , питающей реле P . По рабочей обмотке проходит ток $I_p = I_{IV} - I_{II}$. Ток I_p и н. с. рабочей обмотки $I_p w_p$ приводят в действие реле. Тормозная обмотка w_t включается на ток одного из плеч защиты обычно на ток трансформатора тока III — на главных выводах генератора. Ток I_t и н. с. $I_t w_t$ противодействует срабатыванию реле. Реле может сработать при условии, что $I_p w_p - I_t w_t \geq F_{\text{с.р.}}$; преобразуя это выражение, находим, что

$$I_{\text{р.ср.}} \geq \frac{F_{\text{с.р.}}}{w_p} + \frac{w_t}{w_p} I_t = I_{p0} + k_t I_t, \quad (15-6)$$

где $k_t = w_t/w_p$ — коэффициент торможения.

Характеристика срабатывания реле по уравнению (15-6) показана на рис. 15-11, в. Трехфазная схема защиты дана на рис. 15-11, б.

При внешнем к. з. по обмотке w_p проходит ток $I_{\text{нб}}$. Насыщающийся трансформатор БНТ не пропускает в реле аperiodическую

составляющую $I_{нб}$ и исключает таким образом возможность срабатывания реле от этой составляющей. В реле проходит только переменная составляющая $I_{нб}$. Срабатывание реле под действием этой составляющей предотвращается с помощью тормозной обмотки. По тормозной обмотке w_T проходит ток к. з. ($I_T = I_K$), заглубляющий реле, как это следует из выражения (15-6) и характеристики реле на рис. 15-11, в. Подбирая витки w_p и w_T так, чтобы $I_{нб}w_p < I_Kw_T$, можно исключить действие реле от тока небаланса.

В заграничной практике защита с торможением имеет широкое применение, но без использования БНТ. Такая защита менее надежна в отношении отстройки от тока небаланса в неустановившемся режиме.

д) Выбор тока срабатывания защиты [Л. 2, 6, 22] и трансформаторов тока

Для исключения неправильной работы дифференциальной защиты при внешних к. з. ток срабатывания защиты должен отстраиваться от максимального значения тока небаланса, возникающего в этом режиме. Исходя из этого условия, первичный ток срабатывания определяют по выражению

$$I_{с.з.} = k_H I_{нб. макс}, \quad (15-7)$$

где k_H — коэффициент надежности.

Расчет $I_{нб}$. Согласно (15-4) ток небаланса равен разности намагничивающих токов трансформаторов тока дифференциальной защиты. Он достигает наибольшего значения при максимальном токе внешнего к. з. $I_{K. макс}$. Выражая ток намагничивания трансформаторов тока TI и TII (рис. 15-6, б) через их токовую погрешность в относительных единицах f_{iI} и f_{iII} (см. § 3-1), получаем:

$$I_{нб. макс} = I_{намII} - I_{намI} = (f_{iII} - f_{iI}) I_{K. макс}. \quad (15-8)$$

Для повышения чувствительности защиты при повреждениях в генераторе и надежности при внешних к. з. необходимо выполнить мероприятия по снижению $I_{нб}$, рассмотренные в § 15-2, б, а именно: установить трансформаторы тока класса Р или Д, обеспечить по возможности равенство сопротивлений плеч и выбрать величину сопротивления нагрузки z_H для каждого трансформатора тока по кривым предельной кратности, или 10%-ным характеристикам.

При соблюдении последнего условия погрешность каждого трансформатора тока не может превысить 10% (или 0,1).

Если принять, что $f_{iII} = 0,1$, а $f_{iI} = 0$, то согласно (15-8) небаланс будет наибольшим и равным 0,1 тока к. з.:

$$I_{нб. макс} = 0,1 I_{K. макс}. \quad (15-9)$$

При равномерной нагрузке плеч и идентичности характеристик трансформаторов тока разница в их погрешностях будет меньше 0,1. Это учитывается в расчетной формуле $I_{нб}$ (15-9) с помощью

коэффициента однотипности $k_{\text{одн}}$, тогда

$$I_{\text{нб. макс}} = k_{\text{одн}} \cdot 0,1 I_{\text{н. макс}}. \quad (15-10)$$

При однотипности трансформаторов тока и равенстве сопротивлений плеч принимается, что $k_{\text{одн}} = 0,5$. При несоблюдении этих условий $k_{\text{одн}} = 1$.

Выражение (15-10) определяет установленное значение $I_{\text{нб}}$. В начальный момент к. з. в токе к. з. имеется апериодическая составляющая, которая намагничивает трансформаторы тока и увеличивает их расчетную максимальную погрешность (см. § 11-3) f_i , принятую в выражении (15-10) равной 0,1.

Это увеличение f_i по рекомендации Руководящих указаний [Л. 2] оценивается коэффициентом $k_a = 1 \div 2$. С учетом этого коэффициента в общем случае:

$$I_{\text{нб. макс}} = k_a k_{\text{одн}} f_i I_{\text{н. макс}}, \quad (15-11)$$

где $I_{\text{н. макс}}$ — периодическая составляющая максимального тока к. з., проходящего через трансформаторы тока защиты, при трехфазном к. з. на выводах генератора (вне зоны дифференциальной защиты) в момент времени $t = 0$; $k_{\text{одн}} = 0,5$; $f_i = 0,1$; k_a выбирается с учетом схемы защиты.

Расчетное выражение $I_{\text{нб}}$ по (15-10) и (15-11) является приближенным, поэтому коэффициент k_n в (15-7) следует принимать равным 1,3—1,5. Ниже приводятся некоторые особенности выбора $I_{\text{с.з}}$ в зависимости от схемы защиты и типа дифференциальных реле.

Выбор уставок для схемы с БНТ по рис. 15-10, б. Защита с дифференциальными реле, включенными через БНТ (реле типа РНТ-565), не реагирует на апериодическую слагающую $I_{\text{нб}}$ и поэтому ее нужно отстраивать от периодической составляющей тока небаланса, т. е. от небаланса установленного режима (когда затухают апериодические составляющие $I_{\text{нб}}$). Расчетный ток небаланса определяется по уравнению (15-11), в котором принимается $k_a = 1$. С учетом этого ток срабатывания дифференциальной защиты с реле РНТ согласно (15-7) равен:

$$I_{\text{с.з}} = k_n k_{\text{одн}} f_i I_{\text{н. макс}}. \quad (15-12)$$

Число витков дифференциальной обмотки РНТ определяется по величине намагничивающей силы, необходимой для срабатывания реле $F_{\text{с.р}} = I_{\text{с.р}} w_d$, откуда

$$w_d = \frac{F_{\text{с.р}}}{I_{\text{с.р}}}; \quad I_{\text{с.р}} = \frac{I_{\text{с.з}}}{n_T}.$$

Если защита не должна действовать при обрыве провода в токовых цепях схемы, то кроме условия (15-12) необходимо выполнить условие:

$$I_{\text{с.з}} = 1,3 I_{\text{ном.г}}. \quad (15-12a)$$

В этом случае ток $I_{\text{с.з}}$ принимается равным большему из двух значений по формулам (15-12) и (15-12a), после чего находится число витков $w_d = F_{\text{с.р}} / I_{\text{с.р}}$.

Выбор уставок дифференциальной защиты с реле ДЗТ-11/5, имеющим торможение типа. Уставки выбираются из условия недействительности защиты от тока $I_{\text{нб. макс}}$ при внешнем к. з. Поскольку дифференциальное реле включается через БНТ, то защита отстраивается от периодической составляющей $I_{\text{нб}}$. Исходным для выбора уставок являются заводские параметры реле ДЗТ-11/5. Намагничивающая сила рабочей обмотки, необходимая для срабатывания реле при отсутствии торможения, $F_{\text{с.р}} = 100$ А; число витков w_p рабочей обмотки не регулируется: $w_p = \frac{F_{\text{с.р}}}{0,7} = \frac{100}{0,7} = 142$; здесь 0,7 — ток срабатывания $I_{\text{р0}}$ при $I_{\text{т}} = 0$. Характеристика срабатывания реле $F_{\text{с.р}} = f(F_{\text{т}})$ задается заводом; она имеет вид, аналогичный характеристике I на рис. 15-11, в, но дается в осях координат F_p и $F_{\text{т}}$.

Выбор уставок сводится к определению тока срабатывания $I_{\text{с.з}}$ и числа витков тормозной обмотки $w_{\text{т}}$. Ток срабатывания защиты должен быть больше $I_{\text{нб. макс}}$. Ток небаланса находится по выражению (15-11). Определив $I_{\text{нб. макс}}$, находят $I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} I_{\text{нб. макс}}$; $k_{\text{н}}$ принимается равным 1,3—1,5. Затем подсчитывается н. с. срабатывания рабочей обмотки $F_{\text{с.р}} = w_p I_{\text{с.з}}$. По характеристике реле графическим путем находится н. с. торможения $F_{\text{т}}$, соответствующая расчетному $F_{\text{с.р}}$. По найденному значению $F_{\text{т}}$ определяются витки $w_{\text{т}}$:

$$w_{\text{т}} = \frac{F_{\text{т}}}{I_{\text{к. макс}}^{(3)}}, \quad (15-13)$$

где $I_{\text{к. макс}}^{(3)}$ — максимальный ток при внешнем к. з., по которому рассчитывался ток $I_{\text{нб. макс}}$.

Чувствительность защиты проверяется при к. з. на выводах генератора при отсутствии торможения и при наличии его. В первом случае $k_{\text{з}} = \frac{I_{\text{к}}^{(3)} w_{\text{р}}}{100}$, во втором — $k_{\text{з}} = \frac{I_{\text{к}}^{(3)} w_{\text{р}}}{F_{\text{с.р}}}$; здесь $I_{\text{к}}^{(3)}$ — полный ток к. з. в месте повреждения, он равен сумме токов, поступающих из сети $I_{\text{к. сети}}^{(3)}$ и от генератора $I_{\text{к. ген}}^{(3)}$; $F_{\text{с.р}}$ — определяется по характеристике срабатывания реле при $F_{\text{т}} = I_{\text{к}}^{(3)} w_{\text{т}}$.

Выбор уставок для схемы с простыми токовыми реле (без БНТ и без торможения) по рис. 15-10, а. Токовые реле в этой схеме реагируют на полный ток небаланса. Поэтому защиту необходимо отстраивать от максимального значения $I_{\text{нб}}$ в неустойчивом режиме с. з. по (15-11).

В соответствии с этим $I_{\text{с.з}} = k_{\text{н}} k_{\text{а}} k_{\text{одн}} I_{\text{к. макс}}$, коэффициент $k_{\text{а}}$, учитывающий увеличение тока небаланса в неустойчившемся режиме, принимается равным 2.

Требования к чувствительности дифференциальной защиты.

Чувствительность защиты проверяется по минимальному току к. з.; в качестве такового принимается ток двухфазного к. з. на выводах генератора (в зоне защиты), когда последний отключен от сети. По ПУЭ необходимо иметь $k_{\text{з}} \geq 2$.

При замыкании между собой части витков фаз обмоток статора можно ожидать уменьшения тока к. з. Однако расчет токов к. з. в этом случае весьма труден — содержит много условных допущений и поэтому недостаточно точен. Ориентировочная зависимость величины тока короткого замыкания I_K от процента замкнувшихся витков обмотки статора [Л. 70] приведена на рис. 15-12. На основании этого видно, что теоретически дифференциальная защита может иметь мертвую зону вблизи нулевых выводов обмотки.

Пробой изоляции фаз вблизи нулевых выводов маловероятен вследствие небольшой величины напряжений на этой части обмотки.

Однако повреждение изоляции возможно и вблизи нулевых выводов обмотки в результате механических повреждений, а в генераторах с охлаждением водой — вследствие увлажнения изоляции при утечке воды из-за каких-нибудь неисправностей. Поэтому чувствительность дифференциальных за-

щит должна быть достаточной для действия при повреждении в любой части обмоток статора. Но чувствительность защиты не должна выбираться с ущербом для надежности отстройки от $I_{нб}$.

Оценка дифференциальной защиты. Дифференциальная защита является быстродействующей, чувствительной и простой защитой от междуфазных коротких замыканий.

На мощных генераторах 200 МВт и выше, особенно на генераторах 500—800—1200 МВт, необходимо стремиться к высокой чувствительности и скорости действия дифференциальной защиты для уменьшения объема повреждения, учитывая высокую стоимость крупных машин.

Основными условиями надежной работы защиты при внешнем к. з. и высокой чувствительности при к. з. в зоне являются: 1) выбор трансформаторов тока и их нагрузки таким образом, чтобы погрешность трансформаторов тока не превышала 10%; 2) применение дифференциальных реле, включаемых через БНТ и реле с торможением; 3) надежная отстройка тока срабатывания защиты от тока небаланса.

Некоторым недостатком дифференциальных защит с БНТ является замедление их действия при к. з. в зоне до 0,06—0,1 с.

15-3. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ВИТКАМИ ОДНОЙ ФАЗЫ

Защита от витковых замыканий имеет ограниченное применение вследствие отсутствия простых способов ее осуществления.

Только для мощных генераторов, каждая из фаз которых выполнена в виде двух и более параллельных ветвей, выведенных

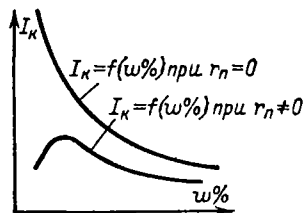


Рис. 15-12. Зависимость величины тока к. з. от процента замкнувшихся витков (r_n — переходное сопротивление в месте замыкания).

наружу, разработаны относительно простые и надежные схемы защиты.

В нормальных условиях и при внешних к. з. в параллельных ветвях 1 и 2 каждой фазы генератора наводятся одинаковые по величине и фазе э. д. с. E_1 и E_2 (рис. 15-13, а). Сопротивления параллельных ветвей равны, поэтому токи ветвей I_1 и I_2 в нормальном режиме и при внешнем к. з. также равны по величине и совпадают по фазе.

В случае замыкания части витков w_k ветви одной фазы в закороченных витках под действием их э. д. с. E_k возникает большой ток к. з. I_k , циркулирующий по закороченным виткам.

Электродвижущая сила и сопротивление поврежденной ветви (на рис. 15-13 ветвь 2) уменьшается за счет повредившихся витков

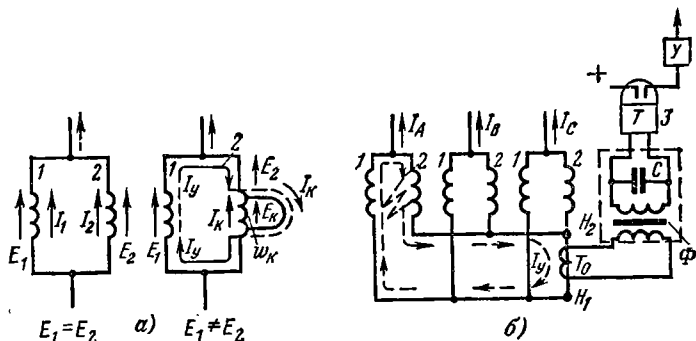


Рис. 15-13. Поперечная дифференциальная защита генератора.

а — распределение токов в параллельных ветвях фазы; б — схема одно-
системной защиты.

w_k , замкнутых накоротко. В результате этого нарушается баланс э. д. с. E_1 и E_2 , а также токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях поврежденной фазы. Появляется э. д. с. $\Delta E = E_1 - E_2$, под действием которой в контуре поврежденной фазы возникает уравнивающий ток

$$I_y = \frac{E_1 - E_2}{x_1 + x_2}, \quad (15-14)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления ветвей 1 и 2 (активные сопротивления не учитываются, так как они очень малы); E_1 и E_2 — э. д. с. неповрежденной и поврежденной ветвей.

Чем меньше число замкнувшихся витков w_k , тем меньше будет различие между E_1 и E_2 . Следовательно, согласно (15-14) с уменьшением w_k будет уменьшаться и ток повреждения I_y из-за уменьшения $E_1 - E_2$.

Нарушение равенства токов в параллельных ветвях статора генератора, происходящее при витковых замыканиях, и появление уравнивающего тока I_y используются для выполнения защиты от этого вида повреждения.

Для защиты от витковых замыканий в СССР применяется поперечная дифференциальная защита, основанная на сравнении токов двух параллельных ветвей фаз генератора. Такое сравнение можно осуществлять с помощью трехсистемной или односистемной схемы защиты.

Трехсистемная схема предусматривает сравнение токов ветвей отдельно для каждой фазы. Для этой цели устанавливаются три токовых реле. Каждое реле включается на разность токов параллельных ветвей фазы A , B и C соответственно.

Односистемная схема выполняется с помощью одного дифференциального реле, *сравнивающего сумму токов параллельных ветвей 1 трех фаз $\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1}$ с такой же суммой токов $\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2}$ другой группы параллельных ветвей 2.*

Односистемная схема получила преимущественное распространение в СССР.

Односистемная схема поперечной дифференциальной защиты. (рис. 15-13, б). Три параллельные ветви 1 фаз статора A , B и C и три параллельные ветви 2 тех же фаз соединяются раздельно в две звезды с двумя выведенными наружу нейтралями H_1 и H_2 . Эти нейтрали соединяются друг с другом нулевым проводом $H_1 - H_2$. В цепи нулевого провода устанавливается трансформатор тока T_0 . К его вторичной обмотке через фильтр Φ подключается токовое реле T . Фильтр Φ пропускает ток основной частоты 50 Гц и задерживает ток высших гармоник, в том числе третьей гармоники.

Из схемы видно, что ток $I_{н.п}$ в нулевом проводе $H_1 - H_2$, питающий реле T , равен разности токов нулевой последовательности звезды двух групп параллельных ветвей 1 и 2:

$$I_{н.п} = (\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1}) - (\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2}) = 3I_{01} - 3I_{02}, \quad (15-15)$$

где I_{01} и I_{02} — ток нулевой последовательности параллельных ветвей 1 и 2.

В нормальном режиме геометрическая сумма токов фаз каждой звезды равна нулю, т. е. $\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1} = 0$ и $\dot{I}_{A2} + \dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2} = 0$.

При трехфазных и двухфазных внешних к. з. сумма токов к. з. в каждой звезде также равна нулю. Токи нагрузки, проходящие при этих повреждениях в ветвях статора, балансируются, так как нейтраль нагрузки не связана с нейтралью генераторов и токи нулевой последовательности в нагрузке и генераторе отсутствуют.

Таким образом, в обоих случаях ток в нулевом проводе по выражению (15-15) $I_{н.п} = 0$ и реле не работает. В действительности ток $I_{н.п} \neq 0$. Вследствие некоторого искажения формы кривой фазных э. д. с. генератора в каждой группе параллельных ветвей возникают гармонические токи, в особенности токи третьей гармоники $I_{1(3)}$ и $I_{2(3)}$. Эти токи совпадают по фазе и суммируются

в нулевом проводе $H_1 - H_2$, образуя результирующий ток: $3I_{1(3)} - 3I_{2(3)} = 3I_{(3)}$.

Вследствие неточного равенства э. д. с. параллельных ветвей E_{A1} и E_{A2} , E_{B1} и E_{B2} , E_{C1} и E_{C2} в контуре каждой фазы появляется уравнивающий ток основной частоты I_{yA} , I_{yB} и I_{yC} . Уравнивающий ток и ток третьей гармоники замыкаются в контуре параллельных ветвей каждой фазы, протекая по нулевому проводу $H_1 - H_2$:

$$I_{н.п} = (3I_{1(3)} - 3I_{2(3)}) + (I_{yA} + I_{yB} + I_{yC}) = 3I_{(3)} + I_y.$$

Токи третьих гармоник забираются фильтром Φ и не попадают в реле. Уравнивающие токи I_y имеют частоту 50 Гц и поэтому беспрепятственно проходят в реле, обуславливая появление в нем тока небаланса:

$$I_{нб} = I_{yA} + I_{yB} + I_{yC} = I_y.$$

Для исключения ложного действия защиты необходимо выполнить условие

$$I_{с.з} > I_{нб}. \quad (15-15a)$$

При замыкании витков в ветви одной из фаз, как было показано выше, равенство токов в ветвях поврежденной фазы нарушается, возникает уравнивающий ток I_y , определяемый выражением (15-14).

Этот ток замыкается по нулевому проводу $H_1 - H_2$ и вызывает появления тока в реле:

$$I_p = \frac{I_y}{n_T}.$$

Защита приходит в действие при $I_y > I_{с.з}$.

Поскольку величина тока I_y уменьшается с уменьшением числа замкнувшихся витков w_k , защита имеет мертвую зону. Она не действует при $I_y < I_{с.з}$. Защита реагирует не только на витковые замыкания, она может сработать при междофазных к. з. и при замыканиях между ветвями одной фазы, так как при этом обычно нарушается равенство э. д. с. и токов в параллельных ветвях поврежденных фаз. В этом можно убедиться, рассмотрев токораспределения в обмотках статора для каждого из указанных повреждений. В обоих случаях защита имеет значительные мертвые зоны.

Трансформатор T_0 , питающий защиту, выбирается без учета тока нагрузки, поскольку ток появляется в нем только при повреждениях, но он должен проходить по условиям термической и динамической устойчивости при максимальном значении тока повреждения.

Этим требованиям отвечает трансформатор тока с первичным номинальным током порядка $0,25 I_{ном.г}$. Исходя из этого, коэффициент трансформатора тока T_0 выбирается по выражению $n_T \approx \frac{0,25 I_{ном.г}}{5}$, при этом вторичный ток T_0 должен соответство-

вать шкале уставок на дифференциальном реле. В отличие от всех остальных схем дифференциальных защит в данной схеме, погрешность трансформатора тока T_0 не вызывает токов небаланса, поэтому к его точности (характеристикам намагничивания) не предъявляют особых требований.

В связи с образованием двух нейтралей (H_1 и H_2) у нулевых выводов обмоток статора трансформаторы тока для продольной дифференциальной защиты генератора должны иметь по две первичные обмотки, состоящие из двух изолированных друг от друга пакетов шин первой и второй параллельной ветвей фазы статора генератора.

Ток срабатывания защиты должен быть больше тока небаланса, появляющегося в реле при внешних к. з.: $I_{с.з} = k_n I_{нб, макс.}$. На основании опыта эксплуатации принимается $I_{с.з} = (20 \div 30\%) I_{ном, г.}$. Как показывает опыт, такая уставка при наличии фильтра обеспечивает достаточную отстройку от тока небаланса и действие защиты согласно расчетам ВНИИЭ при замыкании одного витка (имеется в виду, что обмотка фазы турбогенератора имеет 7—9 витков).

Для выполнения защиты применяется реле РТ-40/Ф, схема которого показана на рис. 15-13, б. Сопротивления обмоток реле и конденсатора C подобраны так, что токи третьей гармоники, циркулирующие по проводу, соединяющему нейтралей H_1 и H_2 , замыкаются главным образом через конденсатор; благодаря этому $I_{с.р}$ при частоте 150 Гц получается в 10 раз больше, чем при токе с частотой 50 Гц. Ток срабатывания реле регулируется отпайками на трансформаторе T и пружиной на реле в пределах 1,75—8,8 А.

В процессе эксплуатации выяснилось, что *поперечная дифференциальная защита может неправильно работать при двойных замыканиях на землю в обмотке ротора*. Это объясняется тем, что витки параллельных ветвей фаз статора располагаются в разных пазах; при двойном замыкании в роторе магнитное поле ротора становится неравномерным; ветви одной фазы попадают в поле с разной магнитной индукцией, в результате чего равенство э. д. с. ветвей нарушается и в реле поперечной дифференциальной защиты появляется ток.

Двойные замыкания на землю в роторе иногда бывают неустойчивыми (носят кратковременный характер). Чтобы исключить в этом случае работу поперечной дифференциальной защиты, можно замедлить ее действие. Однако при этом защита теряет свое быстрое действие, что приводит к увеличению повреждения при витковых замыканиях. Поэтому от применения замедления отказались, допуская срабатывание защиты при двойных замыканиях на землю в обмотке ротора.

Оценка защиты. Достоинством рассмотренной защиты от витковых замыканий являются ее простота и быстрое действие, а недостатком — наличие мертвой зоны и непригодность для защиты генераторов, не имеющих параллельных ветвей.

Защита от витковых замыканий, реагирующая на гармонические составляющие токов повреждения. В связи с недостаточным совершенством применяемых защит во ВНИИЭ разработана новая защита от витковых замыканий типа ЗЗВ-1. Защита обладает достаточно хорошей чувствительностью и может применяться на генераторах с любым числом ветвей в обмотке статора.

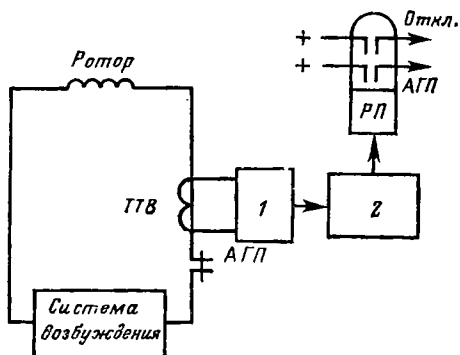


Рис. 15-14. Структурная схема защиты от витковых замыканий, реагирующая на появление тока пятой гармоники в роторе.

практически отсутствует [Л. 112]. Структурная схема защиты ЗЗВ-1, использующей эту особенность, приведена на рис. 15-14. В цепи ротора устанавливается воздушный трансформатор тока ТТВ. Вторичный ток поступает через фильтр 1 в реагирующий орган реле. Фильтр 1 пропускает токи с частотой 250 Гц (пятая гармоника). Этот ток поступает в реле 2, выпрямляется, сглаживается, усиливается и подается в исполнительный орган защиты — промежуточные реле РП (типа РП-212). Защита находится в опытной эксплуатации.

15-4. ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЯ ОБМОТКИ СТАТОРА НА КОРПУС (НА ЗЕМЛЮ)

а) Требования к защите

Как уже отмечалось, в СССР сети генераторного напряжения работают с изолированными нейтралями, а емкостные токи сети компенсируются дугогасящими катушками. При замыканиях на корпус (на землю) обмотки статора ток повреждения I_3 замыкается на землю через магнитопровод статора, вызывая при этом повреждения стали. Размеры повреждения зависят от величины тока и длительности его протекания.

Лаборатория высокого напряжения имени Смурова, проводившая специальные испытания, установила зависимость допустимой продолжительности прохождения тока I_3 от его величины, т. е. $t = f(I_3)$ (рис. 15-15). В частности,

исследования лаборатории показали, что ток 5 А может допускаться длительно. Допустимыми разрушениями считались такие, устранение которых не требует переборки стальных листов статора.

В 1950 г. ЦНИЭЛ МЭС производил опыты непосредственно на генераторе, которые также подтвердили, что ток до 5 А может допускаться длительно. Токи более 5 А вызывают повреждение стали и поддерживают электрическую дугу, вызывающую горение изоляции обмотки статора. Поэтому токи более 5 А могут допускаться лишь ограниченное время.

В эксплуатации имелись случаи длительной работы генератора с замыканием на землю обмотки статора, не сопровождавшиеся опасным повреждением стали при токе замыкания на землю порядка 5 А.

На основании результатов экспериментов и опыта эксплуатации к защите от замыкания на землю генераторов в СССР предъявляются два требования:

а) При токах замыкания на землю менее 5 А защита может действовать на сигнал, так как при этих токах не наблюдается опасных повреждений статора.

б) При токе замыкания на землю 5 А и выше защита должна действовать на отключение генератора, поскольку при этом имеется опасность повреждения стали статора.

б) Принципы выполнения защиты

По принципу своего действия на замыкание на землю в обмотке статора генератора может реагировать дифференциальная защита, но ее использование для этой цели было бы возможным только при глухом заземлении нейтрали, при изолированной нейтрали она оказывается нечувствительной. Поэтому для защиты генераторов от замыканий на землю применяется специальная высокочувствительная защита, реагирующая на ток нулевой последовательности.

В СССР были созданы чувствительные токовые защиты, действующие при токах $I_3 = 4 \div 5$ А. Эти защиты выполняют на естественном емкостном токе или остаточном токе компенсации, не прибегая к искусственным мерам и не предъявляя каких-либо требований к его величине, так как при появлении опасных токов (больше 5 А) действие защиты на отключение генератора обеспечено.

Токи I_0 и напряжения U_0 при замыканиях на землю обмотки статора. В § 9-1 показано, что ток замыкания на землю I_3 равен $3I_0$ и пропорционален напряжению нулевой последователь-

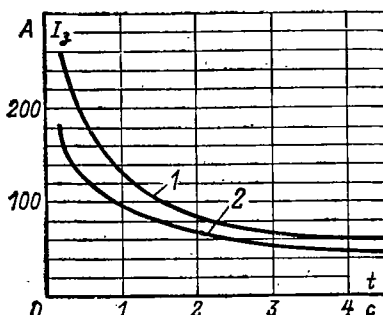


Рис. 15-15. Зависимость допустимой длительности тока замыкания на землю от величины этого тока I_3 .

1 — по данным лаборатории имени Смурова; 2 — по рекомендациям завода «Электросила».

ности U_0 :

$$I_3 = 3I_0 = 3 \frac{U_0}{x_C}, \quad (15-16)$$

где x_C — емкостное сопротивление фазы сети генераторного напряжения.

При замыкании на землю в обмотке генератора (рис. 15-16, а) напряжение U_0 равно напряжению замкнувшихся на землю витков w_3 обмотки фазы статора. С некоторым приближением можно

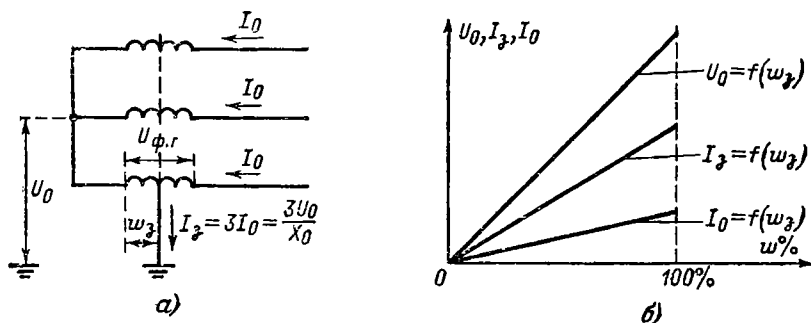


Рис. 15-16. Напряжение U_0 и ток I_0 при замыкании на землю обмотки статора генератора (а); зависимость U_0 , I_0 и I_3 от числа замкнувшихся витков обмотки статора генератора (б).

считать, что напряжение распределяется равномерно по всем виткам фазы. Тогда, выражая w_3 в процентах, от всех витков фазы, получаем:

$$U_0 = \frac{w_3 \%}{100} U_{\phi.r}, \quad (15-16a)$$

где $U_{\phi.r}$ — нормальное напряжение фазы генератора.

Подставив U_0 из (15-16a) в (15-16), найдем:

$$I_3 = 3I_0 = 3 \frac{U_{\phi.r} w_3 \%}{x_C 100}. \quad (15-16б)$$

Из (15-16a) и (15-16б) следует, что U_0 , I_0 и I_3 , появляющиеся при замыкании на землю, пропорциональны числу замкнувшихся витков w_3 . Графически эта зависимость изображена на рис. 15-16, б.

Величины U_0 , I_0 , I_3 имеют максимальное значение при замыкании на землю на выводах генератора. В этом случае $w_3 = 100\%$; подставив это значение в (15-16a) и (15-16б), получим $U_0 = U_{\phi.r}$, а

$$I_3 = 3I_0 = 3 \frac{U_{\phi.r}}{x_C} = 3U_{\phi.r} \omega C,$$

где C — емкость одной фазы сети генераторного напряжения.

При приближении точки замыкания на землю к нейтрали генератора w_3 уменьшается от 100% до 0, вследствие этого умень-

падают и U_0 , I_0 , I_3 , достигая нуля при замыкании в нейтрали генератора (рис. 15-16, б).

При наличии дугогасящей катушки ток замыкания на землю I_3 состоит из двух составляющих: тока, замыкающегося через емкостное сопротивление сети x_C , и тока, замыкающегося через сопротивление дугогасящей катушки x_L .

Результирующий ток равен их разности:

$$I_3 = \frac{3U_0}{x_C} - \frac{3U_0}{x_L} = 3U_{ф.г} \frac{w_3\%}{100} \left(\frac{1}{x_C} - \frac{1}{x_L} \right).$$

Фильтры токов I_0 . Принципиально, как и в защите линий (§ 9-4, б), возможны два способа выполнения токовых защит нулевой последовательности: с трехтрансформаторным фильтром I_0 (рис. 15-17, а) и однитрансформаторным фильтром I_0 — ТНП (рис. 15-17, б).

Первоначально защита выполнялась с помощью трехтрансформаторного фильтра. Такая защита была недостаточно чувствительна, она срабатывала при токах замыкания на землю 15—20 А. Чувствительность этой защиты ограничивалась током небаланса, от которого защита должна быть отстроена, $I_{с.з} > I_{нб}$. Последний определяется погрешностью трансформаторов тока и имеет значительную величину (см. § 9-4, б и в).

В настоящее время защита генератора от замыканий на землю выполняется только по второму способу — с ТНП. Ток небаланса в ТНП значительно меньше, вследствие чего защита получается более чувствительной. Однако ТНП обычной конструкции (см. рис. 9-8) не обеспечивают необходимой чувствительности, поэтому применяются ТНП с подмагничиванием, позволяющим получить требуемую чувствительность защиты (3—5 А первичных).

Принцип действия токовой защиты с ТНП, выполненной по рис. 15-17, б.

При замыкании на землю в обмотке статора возникает напряжение U_0 , под действием которого в каждой фазе генератора появится ток I_{0C} , замыкающийся через емкость C соответствующей фазы сети и место повреждения K . Проходя через магнитопровод ТНП, охватывающий три фазы генератора, три тока I_{0C} ($3I_{0C}$) индуцируют во вторичной обмотке ТНП ток $I_p = 3I_{0C}/k_n$, который питает обмотку токового реле (здесь k_n — коэффициент преобразования первичного тока ТНП во вторичный).

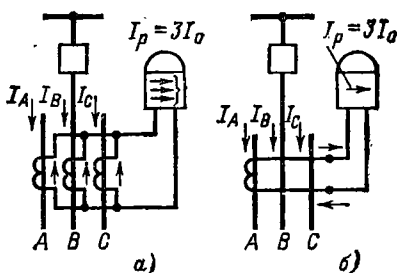


Рис. 15-17. Защита от замыканий на землю.

а — с обычными трансформаторами
б — с ТНП.

Если ток $I_p > I_{c.з}$, то защита приходит в действие. Отнеся токи I_p и $I_{c.з}$ к первичной стороне ТНП, получим, что условием работы защиты является соотношение $3I_{0c} \geq I_{c.з}$, где $3I_{0c} = I_p$ — емкостный ток, поступающий в реле.

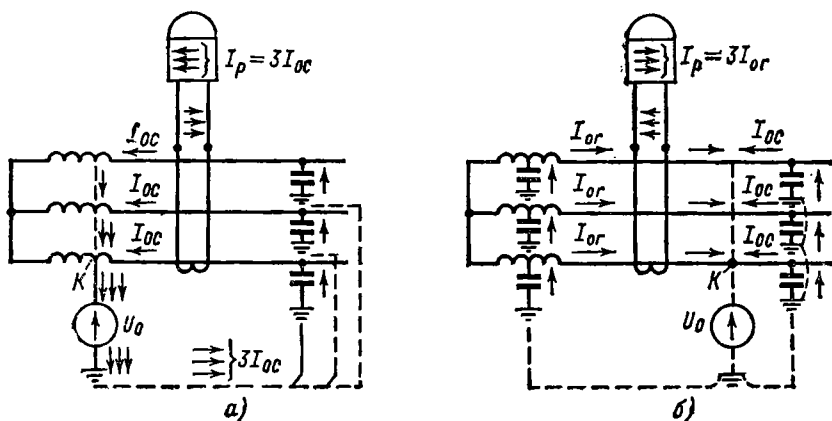


Рис. 15-18. Принцип действия защиты от замыканий на землю с ТНП. Токораспределение при замыкании в генераторе (а); при внешнем замыкании (б).

Если в сети установлена дугогасящая катушка (ДГК), то на ток I_{0c} наложится ток ДГК I_{0L} , замыкающийся по контуру катушка — место повреждения. В этом случае $I_p = 3I_{0c} - 3I_{0L}$, а условие срабатывания примет вид:

$$(3I_{0c} - 3I_{0L}) \geq I_{c.з}$$

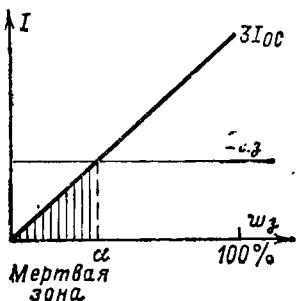


Рис. 15-19. «Мертвая зона» защиты при замыкании на землю.

Поскольку токи I_{0c} и I_{0L} пропорциональны w_3 , то и ток $I_p \equiv w_3$. При замыкании вблизи нейтрали генератора ток I_p может оказаться меньше тока срабатывания (рис. 15-19) и защита не подействует.

Таким образом, защита, реагирующая на ток I_p , по принципу ее действия имеет мертвую зону. Величина мертвой зоны, т. е. число незащищенных витков обмоток α , может быть определена графически как точка пересечения прямых $3I_{0c} = f(w_3)$ и $I_{c.з}$ (рис. 15-19). Мертвая зона является недостатком защиты. Однако создание устройства, обеспечивающего защиту 100% витков обмотки статора, представляет трудную задачу и требует усложнения схемы и реле. Поэтому на генераторах малой и средней мощности мертвая зона считается допустимой, если при повреждении в ней $I_3 < 5 \text{ А}$.

При внешних замыканиях на землю (рис. 15-18, б) под действием напряжения U_0 , появляющегося в месте повреждения, возникают токи I_0 , замыкающиеся через емкость сети и емкость обмоток генератора (I_{0C} и $I_{0Г}$). Токи $I_{0Г}$ проходят через ТНП и реле. Поэтому при внешних замыканиях ток $I_p = 3I_{0Г}$.

Как уже отмечалось в гл. 9, в момент возникновения замыкания появляется нестационарный бросок тока, в 4—5 раз превосходящий установившееся значение $3I_{0Г}$. Очевидно, что защита генератора должна быть отстроена от этого броска тока с некоторым запасом, для чего

$$I_{с.з} > k_б 3I_{0Г},$$

где $k_б$ — коэффициент, характеризующий величину броска емкостного тока.

Величины токов $3I_{0Г}$ по данным завода «Электросила» для турбогенераторов приводятся в табл. 15-4.

Таблица 15-4

Тип турбогенератора	Номинальное напряжение, кВ	Емкостный ток турбогенератора $I_{CГ}$, А	Тип турбогенератора	Номинальное напряжение, кВ	Емкостный ток турбогенератора $I_{CГ}$, А
T-2-12-2	10,5	0,46	ТВФ-100-2	10,5	1,48
T-2-12-2	6,3	0,34	ТВ2-150-2	18,0	3,14
T-2-25-2	10,5	0,92	ТВВ-150-2	18,0	1,64
T-2-25-2	6,3	0,69	ТВВ-200-2	11,0	2,88
T-2-50-2	10,5	1,43	ТВВ-200-2	15,75	0,9
ТВ-60-2	10,5	1,22	ТГВ-200	15,75	3,34
ТВ-100-2	15,75	3,34	ТВВ-200-2	20,0	3,23
ТВ-100-2	13,8	2,15	ТГВ-300	20,0	4,56

Ток небаланса. При нормальной нагрузке и внешних к. з. сумма первичных токов, проходящих через ТНП, равна нулю, поэтому ток в реле должен отсутствовать. Однако за счет несимметрии расположения фаз по отношению к магнитопроводу ТНП в реле защиты появляется ток небаланса $I_{нб}$. В нормальном режиме ток небаланса очень мал. При к. з. $I_{нб}$ возрастает, что может привести к неправильной работе защиты.

Для предупреждения неправильной работы защиты при внешних к. з. можно или загнудить защиту так, чтобы она была надежна отстроена от $I_{нб.к}$, или блокировать, т. е. выводить защиту из действия во время к. з., сохраняя ее нормальную чувствительность.

Предпочтение отдается второму способу, позволяющему обеспечить большую чувствительность защиты.

Применение блокировки исключает действие защиты при одновременных замыканиях на землю в генераторе и сети (двойных замыканиях), так как в этом случае появляется

ток к. з. и защита от замыканий на землю выводится из действия. Поэтому если дифференциальная защита генератора выполнена на двух фазах, то в схеме защиты от замыканий на землю предусматривается второе реле с грубой уставкой, во много раз превосходящей ток небаланса $I_{\text{нб.к}}$, но надежно действующее от тока $3I_0$ при двойных замыканиях на землю.

Для обеспечения необходимой чувствительности защиты ($I_{\text{с.з}} < 5 \text{ А}$) применяются ТНП с подмагничиванием.

Место установки ТНП. Кабели или шины, соединяющие генератор с выключателем, не рекомендуется включать в зону защиты от замыкания на землю генератора. Замыкание на землю в этих элементах не представляет опасности и может быть ликвидировано персоналом так же, как это делается при замыканиях в кабельных линиях. Включение генераторных токопроводов в зону защиты приводит к увеличению тока $I_{0г}$, проходящего через ТНП, при внешних замыканиях на землю и вызывает загробление защиты. По этим причинам ТНП устанавливается непосредственно у выводов генератора.

в) Защита от замыканий на корпус с ТНП, имеющим подмагничивание¹

Конструкция ТНП. Магнитопровод 1 ТНП имеет форму прямоугольника, внутри которого располагаются кабели или токопроводы трех фаз генератора (рис. 15-20). Магнитопровод ТНП выполняется из трансформаторной стали, на нем намотана вторичная обмотка 2, питающая реле.

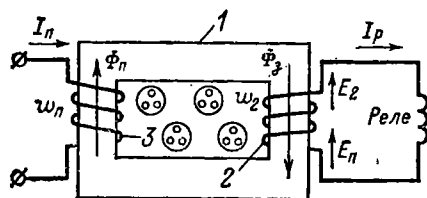


Рис. 15-20. Упрощенная схема ТНП с подмагничиванием.

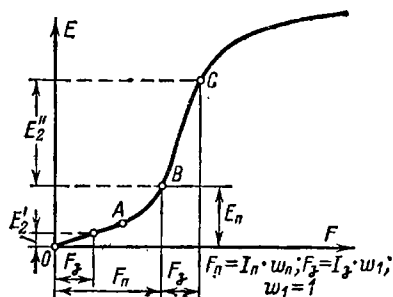


Рис. 15-21. Влияние подмагничивания на вторичную э. д. с. E_2 ТНП.

На рис. 15-21 изображена кривая намагничивания ТНП для переменного тока. Она представляет зависимость э. д. с. на зажимах разомкнутой вторичной обмотки ТНП от намагничивающей силы F первичного тока: $E_2 = f(F)$. Показав на диаграмме н. с. F_3 при токе замыкания на землю I_3 , можно убедиться, что вследствие малой величины I_3 трансформатор работает в началь-

¹ Защита разработана Институтом электродинамики АН УССР.

ной пологой части характеристики намагничивания. Наводимая во вторичной обмотке э. д. с. $E_2 = E'_2$ будет мала; соответственно будет мал и вторичный ток, если вторичную обмотку замкнуть на реле.

Чувствительность защиты значительно возрастает, если на магнитопровод поместить дополнительную обмотку 3 (рис. 15-20), питаемую переменным током I_n от постороннего источника. Намагничивающая сила дополнительной обмотки F_n будет подмагничать магнитопровод, создавая в нем магнитный поток Φ_n . Если при наличии подмагничивания появится тот же ток замыкания на землю I_3 , то созданная им намагничивающая сила F_3 складывается с намагничивающей силой обмотки подмагничивания F_n . В результате этого ТНП работает в более крутой части

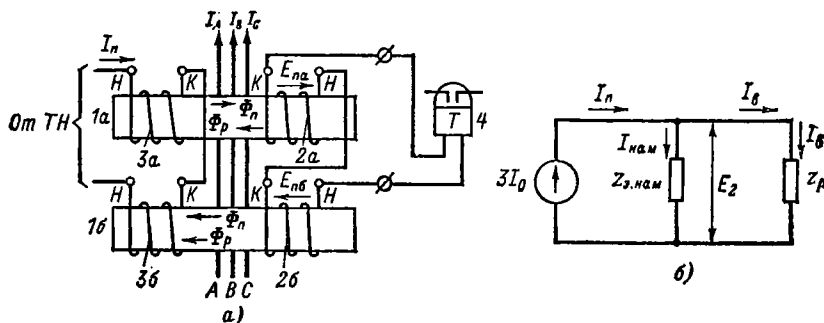


Рис. 15-22. Трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием.

а — конструкция; б — схема замещения; в этой схеме ток I_3 приведен к первичной обмотке.

характеристики намагничивания BC и э. д. с., наводимая током, E'_2 будет значительно (в 15—20 раз) больше, чем при том же I_3 без подмагничивания; соответственно возрастает ток в реле, что повышает чувствительность защиты. Указанное подмагничивание осуществляется переменным током¹ от трансформатора напряжения генератора, поэтому магнитный поток Φ_n , создаваемый обмоткой подмагничивания, будет наводить во вторичной обмотке дополнительную э. д. с. E_n , искажающую работу ТНП. Для устранения вредного влияния обмотки подмагничивания магнитопровод выполняется из двух одинаковых сердечников: 1а и 1б (рис. 15-22). На каждом сердечнике располагаются вторичные обмотки 2а и 2б и обмотки подмагничивания 3а и 3б. Обмотки подмагничивания 3а и 3б соединяются встречно-последовательно и создают в сердечниках магнитные потоки про-

¹ Подмагничивание постоянным током не дает увеличения э. д. с. ТНП, создаваемой током I_3 , и поэтому не может использоваться для повышения чувствительности защиты (подробнее этот вопрос рассмотрен в [Л. 13 и 37]).

типоволоженного направления. Вторичные обмотки 2а и 2б соединяются согласно-последовательно, поэтому наводимые в них током подмагничивания э. д. с. $E_{п.а}$ и $E_{п.б}$ взаимно уничтожаются. Практически за счет неточной балансировки во вторичной обмотке появляется разность этих э. д. с. ($E_{п.а} - E_{п.б} = E_{нб.п}$), создающая ток небаланса $I_{нб.п}$. Его величина может быть точно измерена, она имеет максимальное значение при нормальном напряжении сети.

При замыкании на землю в первичной цепи ТНП появляется ток $3I_0$. Он наводит в обмотках 2а и 2б последовательно направленные и равные по величине э. д. с., которые складываются и вызывают в реле ток $I_p = 3I_0$.

При симметричных к. з. и нагрузке ток в реле должен отсутствовать, однако из-за несимметрии расположения первичных токопроводов во вторичных обмотках ТНП возникает э. д. с. небаланса $E_{нб.нес}$, обуславливающая появление в реле тока $I_{нб.нес}$.

С учетом небаланса от обмоток подмагничивания результирующий ток небаланса

$$I_{нб} = I_{нб.нес} + I_{нб.подм}. \quad (15-16в)$$

Таким образом, при симметричных к. з. и токах нагрузки в реле защиты появляется ток небаланса, состоящий из двух составляющих: одна обусловлена несимметрией расположения фаз первичных токопроводов ТНП $I_{нб.нес}$, вторая — подмагничиванием $I_{нб.подм}$.

Теоретический анализ [Л. 37] и эксперименты показывают, что $E_{нб.нес}$, а следовательно, и $I_{нб.нес}$ пропорциональны величине первичного тока, т. е. $E_{нб.нес} = kI_{перв}$. Расположение вторичной обмотки на магнитопроводе ТНП подобрано с таким расчетом, чтобы $I_{нб.нес}$ имел минимальное значение.

Благодаря этому при нагрузке $I_{нб.нес}$ не превышает 2—3 мА, при к. з. он соответственно возрастает пропорционально I_k .

Число витков во вторичной обмотке выбирается из расчета, чтобы сопротивление намагничивания ТНП равнялось сопротивлению реле ($z_{ТНП} = z_p$). Как известно, при этом условии обеспечивается отдача максимальной мощности от источника питания (вторичной обмотки ТНП) в нагрузку (реле).

При включении на ТНП реле ЭТ-521/0,2, имеющего потребление 0,1 В·А с уставкой 0,1 А, защита работает при токе замыкания на землю 4—5 А. Включая реле ЭТД-551/60 с потреблением 0,01 В·А, можно повысить чувствительность защиты до 3 А. В настоящее время изготавливаются ТНП для генераторов с числом кабелей до 16. Для генераторов с шпильными выводами имеется аналогично выполненная конструкция ТНПШ.

Основное затруднение в конструкции шпильного ТНП составляет ограничение токов небаланса, возникающих из-за большей, чем в кабельных ТНП, несимметрии расположения фаз относительно

магнитопровода. Эти затруднения преодолеваются подбором размещения вторичной обмотки ТНП. Конструкция шинного ТНП показана на рис. 15-23. Токоведущие шины для первичной цепи должны иметь надежную, разделяющую их изоляцию. Форма токоведущих шин выбрана из условия ограничения тока небаланса, наводимого во вторичной обмотке токами, проходящими по шинам. На генераторах, соединяемых со сборными шинами пофазными токопроводами, ТНПШ устанавливаются в специально

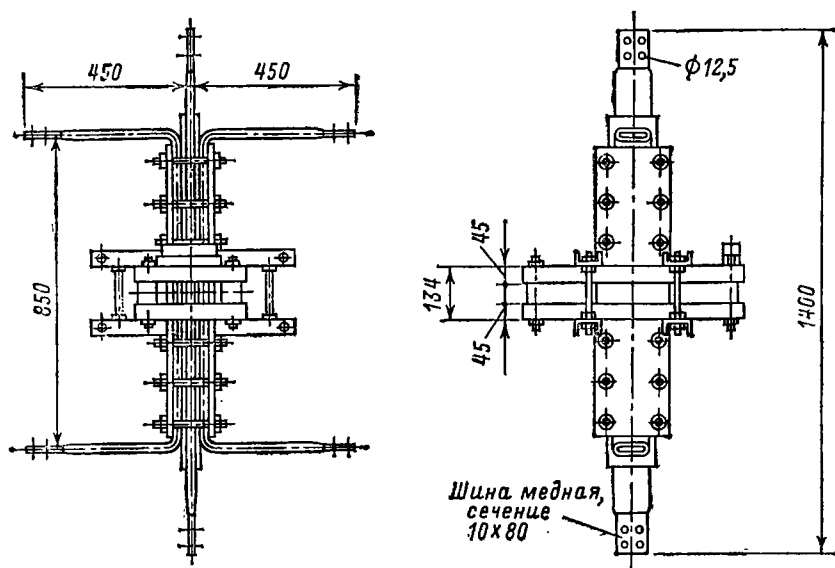


Рис. 15-23. Конструкция ТНП шинного типа.

изготавливаемом комплектном шиноблоке. На шинных ТНП в качестве реагирующего органа применяется реле типа РТЗ-50, имеющее высокую чувствительность и высокий $k_{\text{воз}}$.

Технические данные выпускаемых промышленностью ТНП и ТНПШ приведены в [Л. 2].

Принципиальная схема защиты с ТНП, имеющим подмагничивание, изображена на рис. 15-24. В схеме предусмотрены два токовых реле: чувствительное и грубое. Чувствительное реле 1 предназначено для действия при однофазных замыканиях на землю в обмотке статора генератора. Это реле не отстраивается от токов небаланса при внешних к. з. и поэтому имеет блокировку, выводящую его из действия при внешних повреждениях ¹.

¹ Опыт эксплуатации показывает, что благодаря весьма малым токам небаланса в кабельных ТНП блокировка может не применяться.

В цепи отключения реле 1 предусмотрено реле времени 4 с выдержкой времени 0,5—1 с. Замедление повышает надежность отстройки реле 1 от мгновенных бросков нестационарного емкостного тока при внешних замыканиях на землю и позволяет не считаться с пиками этого тока. В результате этого уменьшается $I_{з.с.}$ и повышается чувствительность защиты. Замедление защиты не ухудшает ее качеств, поскольку максимальные значения токов замыкания на землю ограничены: они обычно не превосходят

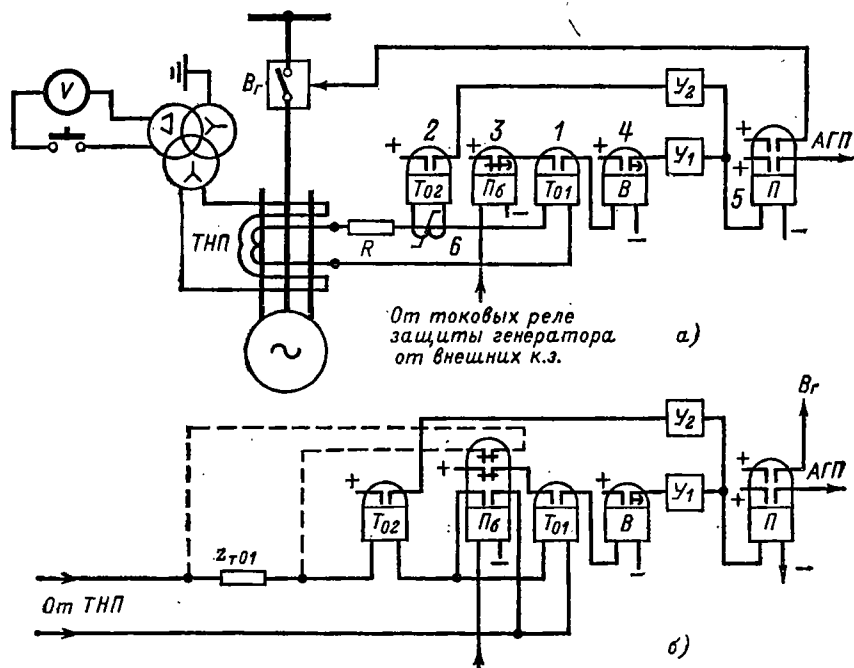


Рис. 15-24. Принципиальная схема защиты от замыканий на землю с ТНП, имеющим подмагничивание.

а — с блокировкой, размыкающей оперативную цепь чувствительного компонента; б — с блокировкой, размыкающей оперативную цепь и шунтирующей токовую цепь защиты.

20—40 А и могут поэтому допускаться в течение нескольких секунд (рис. 15-14). Грубое токовое реле 2 устанавливается для действия при двойных замыканиях на землю (одном — в генераторе и втором — в сети), когда чувствительное реле 1 выводится из работы блокировкой. Реле 2 отстраивается от токов небаланса при внешних к. з. и действует на отключение без выдержки времени.

При больших кратностях тока двойного замыкания на землю возможно искажение формы кривой вторичного тока ТНП и как следствие этого возникновение вибрации подвижной системы и контактов реле 2 и отказ его в работе. Для исключения этого

реле 2 включается на ток ТНП через насыщающийся трансформатор 6 БНТ (рис. 15-24, а). В качестве такого реле применяется реле РНТ-565. БНТ при больших токах насыщается и ограничивает величину тока, поступающего в реле, устраняя таким путем возможность его вибрации.

Во вторичную цепь ТНП включается сопротивление $R = 5 \text{ Ом}$ для ограничения тока в этой цепи при двойных замыканиях на землю. При больших токах магнитная система реле РТЗ-50 насыщается и его сопротивление уменьшается от 45 Ом до 1 Ом, соответственно возрастает вторичный ток ТНП, величина которого зависит от сопротивления вторичной цепи. Большой ток опасен для РТЗ-50 по условию нагрева его обмоток. Сопротивление R ограничивает ток во вторичной цепи ТНП при двойных замыканиях, предупреждая нагрев реле. При однофазных замыканиях на землю сопротивление R также уменьшает ток в защите, но, как показали испытания, это не оказывает существенного влияния на ее чувствительность.

Обмотка подмагничивания ТНП питается от трансформатора напряжения генератора. При обрыве этой цепи защита загроубляется и может отказать при повреждениях с малым током замыкания. Для контроля этой цепи может предусматриваться реле, подающее сигнал при исчезновении тока в его обмотке (на рис. 15-24 не показано).

Б л о к и р о в к а реле 1 осуществляется с помощью промежуточного реле 3, которое пускается от токовых реле защиты генератора от внешних к. з. (симметричных и несимметричных). При своем действии реле 3 разрывает оперативную цепь реле 1, выводя его из действия. На рис. 15-24, б показан второй вариант блокировки; здесь реле 3 разрывает оперативную цепь реле 1 и, кроме того, для обеспечения надежного возврата чувствительного реле 1 шунтирует его обмотку. Такой способ блокировки позволяет выбирать уставку реле без учета коэффициента возврата реле 1, что повышает чувствительность последнего (см. выбор уставок).

При шунтировании токовой обмотки реле 1 сопротивление вторичной цепи ТНП уменьшается. В результате этого резко возрастает ток небаланса, от которого может сработать грубое токовое реле 2. Поскольку реле 2 предназначено для действия при двойном замыкании на землю, его блокировка при к. з. недопустима. Для предупреждения ложного действия реле 2 от $I_{нб}$, появляющегося при шунтировании обмотки реле 1, необходимо или выбрать $I_{с.р}$ реле 2 больше повышенного $I_{нб}$, или ввести при действии блокировки в токовую цепь защиты сопротивление $z_{доп}$, равное сопротивлению реле 1, благодаря чему сопротивление цепи, а следовательно, и $I_{нб}$ остаются неизменными. Ввод $z_{доп}$ осуществляется контактом реле 3, как показано на схеме пунктиром.

Применяя в качестве чувствительного реле 1 РТЗ-50 с $k_{воз} = 0,94$ и выполняя блокировку по первому варианту, можно получить практически ту же чувствительность, что и при шунтировании токовых цепей. Это достигается за счет высокого коэффициента возврата реле, как это следует из выражения (15-17).

Учитывая это, следует предпочесть первый вариант блокировки как более простой.

Выбор уставок чувствительного комплекта защиты [Л. 2]. Первичный ток срабатывания токового реле I выбирается из условия недействия защиты при повреждениях вне генератора (в сети).

Наиболее тяжелым случаем, принимаемым для расчета, является замыкание на землю одной фазы сети (в K_1) при одновременном к. з. между двумя другими фазами в K_2 (рис. 15-25).

В этом случае в реле I появляются бросок емкостного тока генератора $I_{CГ}$, обусловленный замыканием на землю, и ток небаланса $I_{нб}$, вызванный токами к. з., протекающими через ТНП от генератора к месту повреждения. Если блокировка, выводящая чувствительный комплект защиты, размыкает только ее оперативную цепь, то токовое реле I может замкнуть свои контакты под действием появившихся в нем токов $I_{CГ}$ и $I_{нб}$.

После отключения к. з. блокировка возвращается, восстанавливая оперативную цепь, и поэтому необходимо обеспечить возврат реле I при прохождении по нему оставшихся токов $I_{CГ} + I_{нб}$.

Ток $I_{CГ}$ обусловлен оставшимся замыканием на землю (в точке K_1), а ток $I_{нб}$ — протеканием через ТНП токов на-

грузки генератора I_n . Вследствие самозапуска двигателей, происходящего при восстановлении напряжения в сети, ток I_n может иметь повышенное значение.

Исходя из сказанного, $I_{с.з}$ выбирается из условия возврата реле I при прохождении по нему тока $I_p = I_{CГ} + I_{нб}$.

С учетом коэффициента возврата $k_{воз}$ и соответствующих коэффициентов надежности

$$I_{с.з} = \frac{1}{k_{воз}} (k'_н I_{CГ} + k''_н I_{нб(бл)}), \quad (15-17)$$

где $I_{CГ}$ — установившееся значение емкостного тока генератора при «земле» в сети (см. табл. 15-4); $k'_н$ — коэффициент, учитывающий бросок емкостного тока в неустановившемся режиме: при наличии выдержки времени $t = 0,5 \div 1$ с $k'_н = 2 \div 3$; $I_{нб(бл)}$ — ток небаланса при токе нагрузки генератора в послеаварийном режиме, в худшем случае ток I_n равен току возврата блокировки;

k_n'' — коэффициент надежности, учитывающий неточность расчета $I_{нб}$, принимается равным 1,3—1,5.

В схемах с блокировкой, шунтирующей токовую цепь защиты (рис. 15-24, б), возврат чувствительного реле обеспечивается шунтировкой, при которой ток I_p снижается до нуля.

В этом случае ток срабатывания выбирается из условия действия реле от тока $I_p = I_{сг} + I_{нб}$, появляющегося в нем после отключения к. з. в сети K_2 и дешунтирования обмотки реле 1:

$$I_{с.з} = k_n' I_{сг} + k_n'' I_{нб(бл)}, \quad (15-18)$$

где $I_{сг}$, $I_{нб(бл)}$, k_n' , k_n'' — то же, что и в (15-17).

Из сопоставления (15-17) и (15-18) видно, что $I_{с.з}$ при блокировке, шунтирующей токовую цепь реле, получается меньше, чем $I_{с.з}$ по (15-17).

Ток небаланса $I_{нб(бл)}$ в (15-17) и (15-18) отнесен к первичной цепи ТНП. Для его определения находится вторичный ток небаланса $I_{нб(в)}$ проходящий по реле, который затем пересчитывается на первичную сторону ТНП.

Согласно выражению (15-16в) $I_{нб(в)} = I_{нб.нес(в)} + I_{нб.подм(в)}$. Обе составляющие $I_{нб.нес(в)}$ и $I_{нб.подм(в)}$ определяются по формулам, рассмотренным в [Л. 2], согласно которым

$$I_{нб.нес(в)} = \frac{k E_{нб.нес.ном}}{z_p + z_{э.нам.в}}; \quad (15-19)$$

$$I_{нб.подм(в)} = \frac{E_{нб.подм}}{z_p}, \quad (15-19а)$$

где $E_{нб.нес.ном}$ — это $E_{нб.нес}$ при номинальном токе ТНП; k — отношение тока к. з. (при котором определяется $I_{нб}$) к номинальному току ТНП; z_p — сопротивление обмотки реле; $z_{э.нам.в}$ — сопротивление ветви намагничивания в схеме замещения ТНП, отнесенное к вторичной обмотке. Числовые значения $E_{нб}$, z_p , $z_{э.нам.в}$ даются заводом и приведены в [Л. 2].

Полный вторичный ток небаланса

$$I_{нб(в)} = \frac{k E_{нб.нес.ном}}{z_p + z_{э.нам.в}} + \frac{E_{нб.подм}}{z_p}. \quad (15-20)$$

Сопротивление намагничивания равно отношению E_2 ТНП к $I_{нам}$, т. е. $z_{э.нам.в} = E_2 / I_{нам}$ и может определяться по кривой на рис. 15-21. Величина $z_{э.нам.в}$ зависит от степени подмагничивания ТНП, она уменьшается с уменьшением тока подмагничивания. Поэтому для определения максимального небаланса ток $I_{нб(в)}$ определяется для двух случаев — при наличии подмагничивания по (15-20) и при его отсутствии. В последнем случае $E_{нб.подм}$ и $z_{э.нам.в}$ равны нулю и выражение (15-20) принимает вид:

$$I_{нб(в)} = \frac{k E_{нб.нес.ном}}{z_p}. \quad (15-20а)$$

За расчетный $I_{нб(в)}$ принимается большее из двух значений (15-20) и (15-20а).

По найденному $I_{нб(в)}$ можно вычислить первичный ток небаланса, поделив связь между первичным и вторичным токами ТНП.

дал весьма положительные результаты. Нуждается в дальнейшей разработке вопрос об отстройке защиты от бросков емкостного тока при замыканиях на землю вне генератора.

15-5. ЗАЩИТА ОТ СВЕРХТОКОВ ПРИ ВНЕШНИХ К. З. И ПЕРЕГРУЗКАХ

а) Назначение и виды защит от внешних к. з.

Защита генераторов от внешних к. з. служит для отключения генераторов при повреждениях на сборных шинах электростанции или на отходящих от них присоединениях.

Нормально указанные к. з. отключаются защитой поврежденных элементов (т. е. шин или линий и трансформаторов), поэтому защита на генераторах от внешних к. з. является резервной и работает только в случае отказа защиты или выключателей этих элементов.

В тех случаях, когда сборные шины генераторного напряжения не имеют специальной защиты, защита генератора от внешних к. з. служит основной защитой генератора от повреждений на шинах и резервной при повреждении на присоединениях.

Защита от внешних к. з. д о п о л н и т е л ь н о используется для резервирования дифференциальной защиты генератора при междуфазных к. з. в нем.

Таким образом, *в зону действия защиты от внешних к. з. должны входить: генератор, сборные шины и отходящие от них присоединения.*

Выполняя функции резервной защиты генератора, защита от внешних к. з. должна действовать на отключение генератора и АГП.

К защите от внешних к. з. предъявляется одно очень важное требование — она не должна работать при перегрузках и качаниях.

При несоблюдении этого условия могут происходить массовые отключения генераторов при неопасных для них перегрузках и качаниях, что приводит к дефициту генераторной мощности и тяжелым авариям в энергосистемах.

В соответствии с поставленными требованиями в качестве защиты генераторов от внешних к. з. в настоящее время применяются максимальные токовые защиты с блокировкой (или пуском) от реле напряжения и защита обратной последовательности (реагирующая на ток I_2) с дополнительной приставкой, действующей при трехфазных повреждениях.

Простая максимальная токовая защита (без блокирующих реле напряжения) реагирует на кратковременные и неопасные перегрузки и поэтому не должна применяться на генераторах, отключение которых при перегрузках и качаниях недопустимо.

б) Максимальная защита с блокировкой (пуском) по напряжению

Защита выполняется в двух вариантах: с блокировкой, осуществляемой с помощью трех реле минимального напряжения H (рис. 15-27), и с блокировкой, выполненной по комбинированной схеме, состоящей из реле напряжения обратной последовательности H_2 и одного реле минимального напряжения H , включенного на линейное напряжение (рис. 15-28).

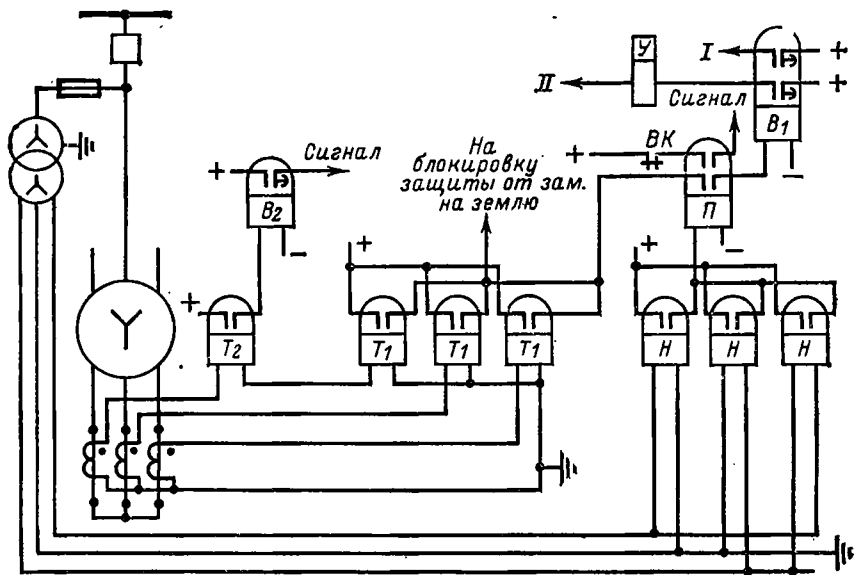


Рис. 15-27. Схема максимальной токовой защиты с блокировкой (пуском) минимального напряжения.

В обеих схемах токовые реле T питаются от трансформаторов тока, расположенных на нулевых выводах генератора. При таком подключении максимальная защита не только реагирует на внешние к. з., но и резервирует дифференциальную защиту генератора, действуя от тока генератора при повреждении в нем.

Включение токовых реле на трансформаторы тока со стороны шинных выводов генератора нецелесообразно с точки зрения защиты самого генератора. В этом случае при повреждении в обмотках генератора защита действует только при наличии тока из сети. Если ток со стороны сети отсутствует (из-за отсутствия параллельно работающих генераторов или связи с системой) или прекратился вследствие отключения связи с другими генераторами раньше, чем сработала максимальная защита поврежденного генератора, то она не сможет подействовать и не ликвидирует повреждения в генераторе.

В с х е м е н а р и с. 15-28 реле минимального напряжения H питается междуфазным напряжением через нормально замкнутые контакты реле H_2 . Реле H_2 включено через фильтр обратной последовательности на напряжение U_2 . При несимметричных к. з. появляется напряжение U_2 и реле H_2 срабатывает, снимая напряжение с реле H . Последнее замыкает свои контакты и разрешает токовым реле действовать на отключение. При симметричном к. з. реле H_2 размыкает свои контакты кратковременно. Реле H успевает сработать, но затем после исчезновения несимметрии и возврата H_2 поведение реле H будет зависеть от уровня остаточного напряжения U_k на его зажимах.

Если $U_k < U_{\text{воз}}$ реле H , то оно останется в сработанном состоянии и разрешит действовать защите. Если же $U_k > U_{\text{воз}}$, то реле H возвратится и защита не сможет подействовать. Таким образом, чувствительность блокировки при симметричных к. з. определяется не $U_{\text{с.р.}}$, а $U_{\text{воз}}$ реле H . Поскольку $U_{\text{воз}} < U_{\text{с.р.}}$ на 10—15 %, то, следовательно, при симметричных к. з. схема с комбинированным пуском чувствительнее, чем схема с обычной блокировкой на рис. 15-27.

П р и н е с и м м е т р и ч н ы х к. з. схема с реле H_2 также чувствительнее обычной схемы за счет большей чувствительности реле H_2 по сравнению с реле H .

П р и с и м м е т р и ч н ы х п е р е г р у з к а х реле H_2 и H не действуют, запрещая работать защите.

Уставки защиты. Ток срабатывания токовых реле в схемах максимальных защит с пуском по напряжению выбирается из условия их возврата при номинальном токе генератора:

$$I_{\text{с.з}} = \frac{k_n}{k_{\text{воз}}} I_{\text{ном.г.}} \quad (15-21)$$

Коэффициент надежности k_n обычно принимается равным 1,1—1,2.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения H , включенного на междуфазное напряжение, в обеих схемах выбирается из следующих соображений.

Реле минимального напряжения должны удовлетворять двум условиям:

а) возвращаться при минимальном уровне рабочего напряжения $U_{\text{раб.мин}}$ после отключения к. з. в сети, для чего необходимо выбрать

$$U_{\text{с.з}} = \frac{U_{\text{раб.мин}}}{k_n k_{\text{воз}}}, \quad (15-22)$$

где k_n — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,1—1,2; $U_{\text{раб.мин}} = 0,95 U_{\text{раб.ном.}}$

б) не действовать при понижении напряжения на зажимах генератора, вызванном самозапуском двигателей или асинхронным режимом работы генератора, имеющим место при потере возбуждения. Расчеты и опыты показывают, что в обоих случаях

папряжение может понижаться до $(0,65 \div 0,7) U_{\text{раб. норм.}}$. Для исключения действия реле в этих условиях необходимо иметь:

$$U_{\text{с.з}} = (0,6 \div 0,5) U_{\text{раб. норм.}} \quad (15-22a)$$

Условие п. «б» является определяющим, поэтому $U_{\text{с.з}}$ выбирают по (15-22a). Напряжения срабатывания реле обратной последовательности H_2 в схеме с комбинированным пуском выбирается из условия отстройки от напряжения небаланса на выходе фильтра. На основе опыта эксплуатации принимается:

$$U_{\text{с.з2}} = 0,06 U_{\text{раб. норм.}} \quad (15-22б)$$

Чувствительность защиты проверяется по току и напряжению при к. з. на шинах и в конце второго участка согласно выражениям: по току

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к. мин}}}{I_{\text{с.з}}} ; \quad (15-23)$$

по напряжению для реле H в схеме по рис. 15-27

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{с.з}}}{U_{\text{к. макс}}} , \quad (15-24)$$

где $U_{\text{к. макс}}$ — наибольшее остаточное напряжение при двухфазном к. з. в конце второго участка.

Для реле H в схеме с комбинированным пуском чувствительность проверяется по $U_{\text{воз}}$ при трехфазных к. з., так как при двухфазных к. з. работает реле H_2 , а при трехфазных — оно в первый момент к. з. снимает напряжение с реле H и дальнейшее поведение реле H определяется $U_{\text{воз}}$ этого реле. С учетом сказанного

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{\text{воз}}}{U_{\text{к. макс}}} , \quad (15-24a)$$

для реле H_2

$$k_{\text{ч}} = \frac{U_{2\text{к. мин}}}{U_{\text{с.з2}}} , \quad (15-24б)$$

где $U_{2\text{к. мин}}$ — наименьшее напряжение обратной последовательности при двухфазном к. з. в конце второго участка.

Выдержка времени. По условию селективности время действия защиты не должно быть меньше

$$t = t_{\text{прис}} + \Delta t, \quad (15-25)$$

где $t_{\text{прис}}$ — наибольшая выдержка времени на защите присоединений, питающихся от генераторных шин.

При выборе уставки по времени необходимо учитывать большую ответственность генераторов, являющихся источниками питания, и отсутствие необходимости в быстром отключении генераторов при внешних к. з. по условиям работы самого генератора. В то же время необходимо считаться с тем, что процесс восстановления

ления напряжения на генераторах и снижение их токов нагрузки во время тяжелых аварий могут проходить относительно медленно. Для предотвращения преждевременного отключения генераторов в подобных режимах, когда пусковые реле защиты могут возвращаться не сразу после отключения к. з., выдержка времени на максимальной защите генераторов выбирается порядка 5—8 с. Повышение t_3 улучшает также отстройку защиты от качаний.

в) Токовая защита от симметричной перегрузки

На электростанциях, имеющих постоянный дежурный персонал, защита от перегрузки должна действовать на сигнал и выполняться по схемам, приведенным на рис. 15-27 и 15-28.

Перегрузка, как правило, является симметричным режимом. Поэтому защита от перегрузки выполняется при помощи одного токового реле T_2 , включенного в одну из фаз генератора. Срабатывая, оно действует на реле времени B_2 , которое подает сигнал. Поскольку перегрузка может продолжаться длительно, реле времени B_2 должно быть термически устойчивым. Ток срабатывания токового реле T_2 выбирается по выражению (15-9). Для повышения чувствительности к перегрузкам k_n применяется равным 1,05.

Выдержка времени на реле времени выбирается несколько большей, чем на защите от внешних к. з., с тем чтобы защита от перегрузки не давала сигналов при внешних к. з., отключаемых защитой.

На электростанциях без постоянного дежурного персонала максимальная токовая защита от перегрузки должна выполняться с двумя выдержками времени и действовать: с меньшей — на сигнал и снижение возбуждения, а с большей — на отключение выключателя и АП.

Для мощных генераторов ведется разработка защиты с зависимой характеристикой, соответствующей тепловой характеристике генератора. Такую защиту следует выполнять с действием на отключение.

г) Токовая защита обратной последовательности

Назначение, требование и принцип действия. Как указывалось в § 15-1, б, несимметрия токов в статоре является опасным режимом для генераторов, особенно для генераторов с непосредственной системой охлаждения. Подобные несимметрии возникают при внешних двухфазных и однофазных к. з. и в режиме нагрузки, при обрыве одной или двух фаз, например вследствие обрыва провода на линии электропередачи или недовключения фаз выключателя. Повышенный ток при неотключившихся внешних несимметричных к. з. нагревает статор генератора, а токи обратной последовательности, появляющиеся при несимметричных внешних к. з. и нагрузках, индуцируют в роторе вихревые токи,

вызывающие опасный нагрев металлических частей и обмотки последнего (см. § 15-1, б).

Следствие недостаточной чувствительности максимальной защиты к несимметричным внешним к. з. и недействия ее при несимметричных нагрузках разработана и применяется токовая защита обратной последовательности, реагирующая на появление тока I_2 . Эта защита выполняет функции д в у х защит: 1) защиты от чрезмерного нагрева ротора генератора при несимметричных к. з. и нагрузках и 2) резервной защиты статора при несимметричных к. з. и нагрузках, а также при к. з. в самом генераторе в случае отказа его дифференциальной защиты.

В первом случае защита должна удовлетворять двум условиям: во-первых, она должна срабатывать при I_2 , превышающем максимальный длительно допустимый ток $I_{2\text{доп. макс}}$ по условию нагрева ротора, для чего необходимо иметь:

$$I_{с.з} \approx I_{2\text{длит. доп. макс}}, \quad (15-26)$$

и, во-вторых, должна иметь выдержку времени

$$t_3 \leq t_{\text{доп}} \quad \text{или} \quad t_3 = k_n t_{\text{доп}}, \quad (15-26a)$$

где $t_{\text{доп}}$ — время, в течение которого ротор при данном значении I_2 нагревается до предельной температуры, определяется по тепловой характеристике ротора из уравнения (15-1); k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 0,9—1.

Во втором случае (в качестве резервной защиты статора) защита обратной последовательности должна иметь чувствительность, достаточную для отключения несимметричных к. з. в конце зоны резервирования, и действовать с наименьшей выдержкой времени, обеспечивающей селективность.

Указанные требования можно выразить следующими соотношениями:

$$I_{с.з} < I_{2\text{к. мин}}, \quad (15-26б)$$

$$t_3 = t_n + \Delta t, \quad (15-26в)$$

где $I_{2\text{к. мин}}$ — минимальный ток обратной последовательности в генераторе при к. з. в конце самой длинной линии, отходящей от шин электростанции; t_n — выдержка времени защиты линий, отходящих от шин электростанции.

Характеристика реле. Наилучшим способом защиты ротора от нагрева токами обратной последовательности является защита с зависимой от тока I_2 характеристикой $t_3 = f(I_2)$, соответствующей тепловой характеристике ротора по уравнению (15-1). Отвечающая этому условию характеристика защиты

$$t_3 = k_n t_{\text{доп}} = k_n \frac{A}{I_2^3} \quad (15-27)$$

показана пунктиром на рис. 15-29.

Защита с зависимой характеристикой 1 позволяет полностью использовать перегрузочные возможности генератора, что является ее главным достоинством. Однако простой и серийно выпускаемый конструкции реле с зависимой характеристикой в Советском Союзе пока еще нет, и поэтому на практике применяется защита обратной последовательности со ступенчато-зависимой характеристикой 2 (рис. 15-29). Как видно из рис. 15-29, независимая защита не позволяет полностью использовать перегрузочные возможности генератора и отключает его раньше, чем это допустимо по условию нагрева, что является ее существенным недостатком. Ниже рассмотрены общие принципы выполнения обеих защит.

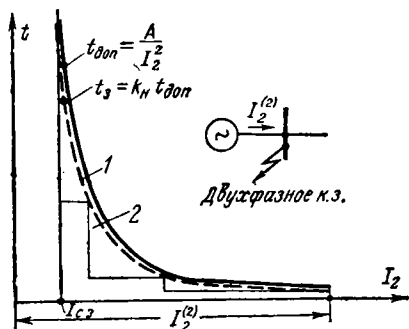


Рис. 15-29. Зависимая и ступенчатая характеристика выдержки времени защиты обратной последовательности генератора.

Токовая защита обратной последовательности с зависимой характеристикой. Все разновидности этой защиты (рис. 15-30) состоят из трех токовых реле T_1 , T_2 , T_3 , питающихся током I_2 от фильтра обратной последовательности Φ_2 .

Реле T_1 действует на сигнал, предупреждая дежурный персонал о появлении опасных токов $I_2 > I_{2\text{длит. доп. макс.}}$.

Сигнальное реле предназначено для работы при малых

кратностях тока I_2 , которые могут допускаться по условиям нагрева ротора в течение 2 мин и более. Предполагается, что за это время (2 мин и более) дежурный персонал может принять меры к устранению несимметрии, а при отсутствии такой возможности своевременно отключить генератор. По тепловой характеристике ротора (рис. 15-2) можно установить, что $t_{\text{доп}} > 2$ мин имеет место в начальной части характеристики в диапазоне токов от $I_{2\text{макс. длит. до}} (0,4 \div 0,6) I_{\text{ном. г.}}$.

Ток срабатывания реле T_1 отстраивается от $I_{2\text{длит. доп. макс.}}$ с учетом $k_{\text{воз}}$ реле, т. е.

$$I_{\text{с. з1}} = \frac{1,05 I_{2\text{длит. доп. макс.}}}{k_{\text{воз}}} \quad (15-28)$$

Выдержка времени t_1 выбирается так, чтобы сигнализация не действовала при к. з. в сети, но была не больше 5—6 с, чтобы дежурный имел возможно больше времени для проведения операций по ликвидации несимметрии.

Реле T_2 является защитой ротора от несимметричных режимов с такими токами I_2 , при которых ручная ликвидация несимметрии невозможна, так как требуется быстрое отключение генератора с $t < 2$ мин. Это реле должно иметь зависимую харак-

теристическую согласно уравнению (15-27) и должно действовать при токах I_2 , которым соответствует по тепловой характеристике ротора $t_{\text{доп}} \leq 2 \text{ мин}$. Отвечающий этому условию ток находится из уравнения (15-1), если принять в нем $t_{\text{доп}} = 2 \text{ мин}$ (120 с):

$$I_{\text{с.зII}} = \sqrt{\frac{A}{t_{\text{доп}}}} = \sqrt{\frac{A}{120}}. \quad (15-28a)$$

Реле T_3 служит резервной защитой от неотключившихся несимметричных к. з. внешних или в генераторе. Генератор в этих случаях следует отключать, не дожидаясь, когда истечет допустимое время $t_{\text{доп}}$ по условию нагрева статора

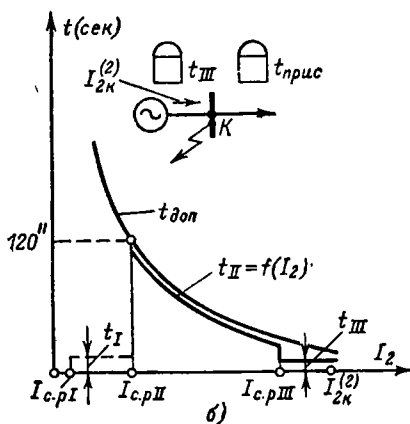
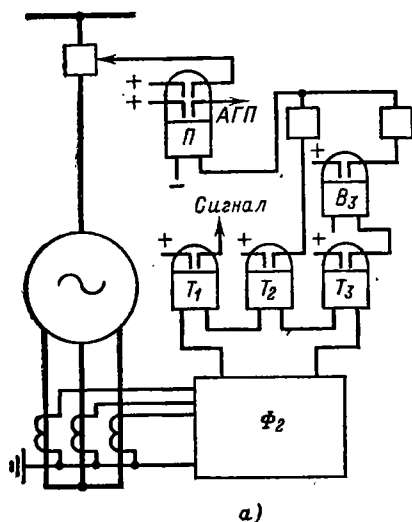


Рис 15-30. Токовая защита обратной последовательности с зависимой от тока I_2 характеристикой.

а — схема; б — характеристика $t_3 = f(I_2)$.

и ротора. Реле T_3 действует на отключение генератора и АГП с независимой от тока I_2 выдержкой времени t_{III} , создаваемой реле времени B_3 (рис. 15-30, а). Ток срабатывания реле T_3 выбирается так, чтобы оно надежно действовало при несимметричных к. з. в конце зоны резервирования, т. е. $I_{\text{с.зIII}} < I_{2\text{к.мин}}$. Выдержка времени t_{III} выбирается из двух условий:

1) селективности с защитами присоединений, отходящих от шин электростанции, $t_{\text{III}} = t_{\text{прис}} + \Delta t$;

2) согласования с $t_{\text{доп}}$ по тепловой характеристике ротора при наибольшем значении $I_{\text{ок.макс}}$ в случае двухфазного к. з. на выводах генератора (точка К на рис. 15-30, б): $t_{\text{III}} \leq t_{\text{доп}}$ при $I_{2\text{к.макс}}$. Второе условие является обязательным.

Характеристика времени действия рассмотренной защиты приведена на рис. 15-30, б.

Принципы выполнения зависимых токовых реле T_2 . В Советском Союзе разработаны конструкции зависимых реле, реагирующих на значение $I_2^2 t$, косвенно характеризующее количество тепла, выделенное в роторе при прохождении тока I_2 в статоре за время t .

Поскольку значение тока I_2 во время несимметричного режима может изменяться, то для правильного определения допустимого времени $t_{\text{доп}}$ зависимое реле должно суммировать величины $I_2^2(t)t$ в каждый момент времени или, иначе говоря, осуществлять интегрирование $\int_0^t I_2^2(t)dt$. Реле должно

срабатывать, когда $\int_0^t I_2^2(t)dt = A$, т. е. когда количество тепла, обусловленное током I_2 , достигает значения $Q_{\text{пред}} = kA$, при котором температура наиболее нагретого элемента ротора повысится до предельно допустимого значения. *Характеристика реле $t_a = f(I_2)$, учитывающая процесс нагрева ротора при изменяющемся значении тока I_2 , называется интегральной.*

При исчезновении I_2 вследствие ликвидации несимметричного режима процесс возврата реле в начальное состояние должен соответствовать процессу остывания ротора генератора.

Наиболее удачными являются конструкция на магнитных элементах с прямоугольной характеристикой намагничивания, предложенная ВНИИЭ [Л. 93], и реле, разработанные Энергосетьпроект и ВНИИР на полупроводниках с использованием для получения интегрально зависимой характеристики процесса заряда и разряда конденсатора [Л. 94]. Опытная партия реле последнего типа РТФ-6М выпущена ЧЭАЗ. Однако поскольку окончательной схемы этого реле еще нет, ниже рассматриваются основные принципы выполнения аналогичного реле, разработанного Энергосетьпроект. Упрощенная структурная схема этого реле показана на рис. 15-31, б. Реле состоит из фильтра тока $I_2(I)$; выпрямителя 2; преобразователя 3, преобразующего ток I_2 в ток $I_n = kI_2^2$; интегратора 4, обеспечивающего работу реле с выдержкой времени, обратно пропорциональной I_2^2 , с учетом меняющегося значения тока I_2 ; исполнительного органа 5, подающего импульс на отключение.

Интегратор. В качестве интегратора используется конденсатор C (рис. 15-31, а), процесс заряда которого во времени происходит по такому же закону, как и адиабатический нагрев ротора от тока I_2 . Заряд конденсатора характеризуется уравнением

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int_0^t I_{C(t)} dt, \quad (15-29)$$

где U_C и C — напряжение и емкость конденсатора; $I_{C(t)}$ — мгновен-

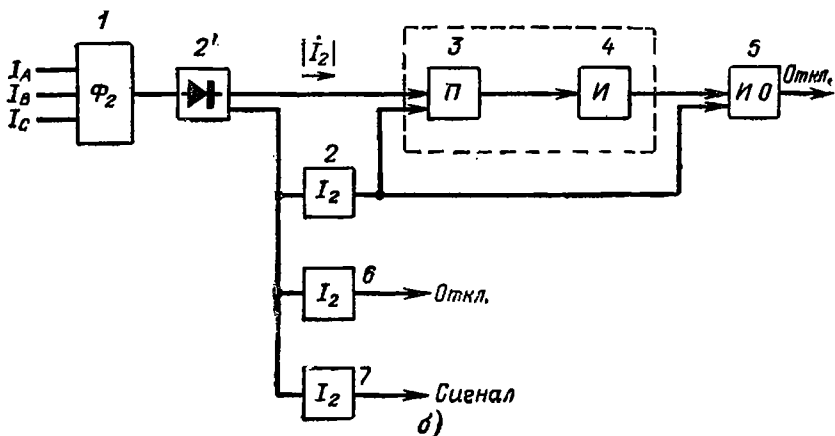
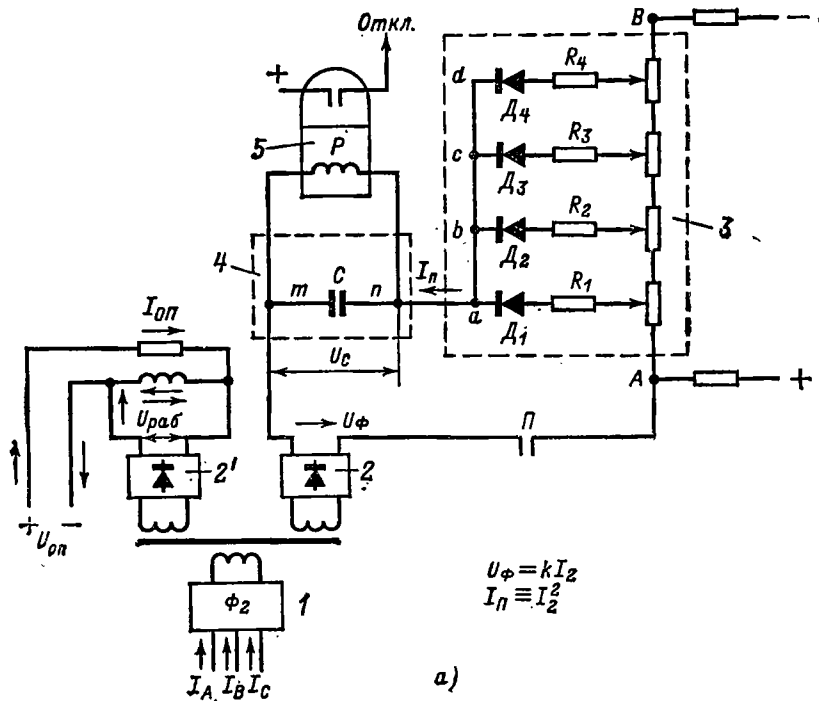


Рис. 15-31. Упрощенная принципиальная схема зависимой защиты, реагирующей на I_2 .

а — реле, основанное на заряде конденсатора; б — структурная схема защиты,

венное значение зарядного тока конденсатора; q — заряд конденсатора, равный $\int_0^t I_{C(t)} dt$.

Из (15-29) получим:

$$U_C C = \int_0^t I_{C(t)} dt. \quad (15-29a)$$

Сравнив (15-29a) с (15-2) и (5-13), можно сделать вывод, что при $U_C C = A$ и $I_{C(t)} = I_2^2(t)$ оба выражения идентичны и поэтому конденсатор может служить электрической моделью нагрева ротора.

Возможны две схемы интегратора с конденсатором C : одна — основанная на его заряде и вторая — на разряде. Схема интегратора с использованием заряда конденсатора приведена на рис. 15-31. При появлении тока I_2 на зажимах mn возникает напряжение и конденсатор C начинает заряжаться током $I_{\Pi} \equiv I_2^2$.

В процессе заряда конденсатора напряжение U_C на его зажимах mn будет расти. Реле срабатывает, когда U_C достигает значения $U'_C = A$. Время, в течение которого U_C достигнет U'_C , зависит от величины тока I_2^2 . Чем больше будет зарядный ток, определяемый величиной I_2^2 , тем меньше будет время нарастания U_C до U'_C , а следовательно, и время действия реле t_3 .

В обоих вариантах интегрального органа принимаются меры для исключения влияния на величину тока I_{Π} напряжения U_C , меняющегося в процессе заряда. Ток I_{Π} должен зависеть только от величины I_2 . На время действия схемы оказывают влияние токи утечек, имеющие место в конденсаторе и зависящие от температуры. Схема с перезарядом конденсатора в меньшей мере подвержена искажающему влиянию токов утечек и поэтому считается лучшей.

Преобразователь. В обоих вариантах ток $I_{\Pi} = I_2^2$ получается от преобразователя $З$. Преобразование тока I_2 в ток I_2^2 может осуществляться различными способами. Простейшая схема диодного преобразователя $З$ показана на рис. 15-31, а. Как видно из схемы, к диодам преобразователя $З$ подводятся два напряжения: напряжение U_{Π} , с потенциометра запирающее диоды, и напряжение $U_{\Phi} = kI_2$ от фильтра Φ_2 , открывающее их. Когда $U_{\Phi} = 0$, диоды закрыты и ток преобразователя I_{Π} отсутствует. При появлении I_2 возникает U_{Φ} . Когда оно станет больше напряжения потенциометра между

точками A и a , диод D_1 открывается и возникает ток $I_{\Pi 1} = \frac{U_{\Phi} - U_{A-a}}{R_1}$. При $U_{\Phi} > U_{A-b}$ открываются два диода D_1 и D_2 и т. д. Величина тока I_{Π} зависит от числа открывающихся диодов, а последнее зависит от величины $U_{\Phi} \equiv I_2$. Параметры сопротивлений подобраны так, что при подходе к преобразователю тока I_2 выходной ток его $I_{\Pi} = I_2^2$. Этим током и осуществляется заряд конденсатора C .

Реле обратной последовательности типа РТФ-6М имеет такую же структурную схему, как и рассмотренное реле (рис. 15-32). Оно отличается от предыдущей конструкции устройством зависимого элемента. Реле РТФ-6М состоит из сигнального элемента I , двух токовых элементов 2 и 3 , именуемых отсечкой I и отсечкой II , они предназначены для работы при несимметричных к. з. и имеют разные зоны действия и независимую выдержку времени; зависимый (интегральный) элемент 5 с характеристикой по уравнению

(15-2); пусковой элемент 4, осуществляющий пуск зависимого элемента при определенном значении I_2 . Все элементы схемы реагируют на ток, получаемый от трансформаторного фильтра Φ_2 . Ток I_2 преобразуется в напряжение соответствующей величины трансформатором T и выпрямляется двумя выпрямителями $B1$ и $B2$. Первый питает зависимый элемент 5, второй — остальные элементы схемы.

Сигнальный элемент, отсечки I и II и пусковой элемент выполнены однотипно на принципе сравнения напряжения $U_p \equiv I_2$ с опорным напряжением $U_{оп}$. Реле срабатывает, если $U_p \geq U_{оп}$. В качестве нуля-индикатора используется магнитоэлектрическое

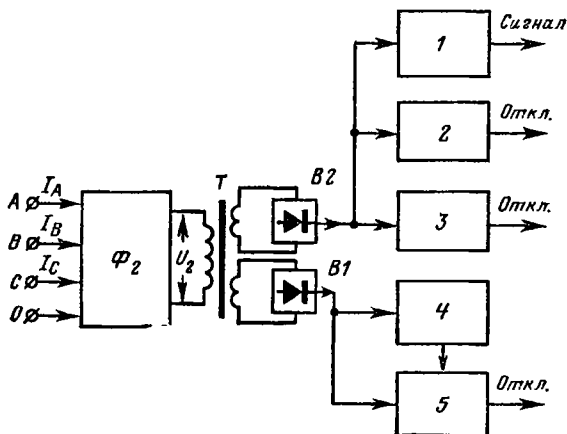


Рис. 15-32. Структурная схема защиты обратной последовательности типа РТФ-6.

реле. З а в и с и м ы й элемент основан на использовании процесса заряда конденсатора током $I_{зар} \equiv I_2^2$. Для преобразования тока I_2 в ток $I_{зар}$ служит частотно-импульсный модулятор.

В качестве выходного реагирующего элемента служит триггер, воздействующий на исполнительное реле.

Характеристика реле аналогична показанной на рис. 15-30, б.

Ступенчатая защита обратной последовательности с независимой характеристикой. Ступенчатая защита рекомендуется к применению [Л. 103] на генераторах с непосредственным охлаждением обмоток, пока не появятся достаточно совершенные реле с зависимой характеристикой.

Схема и характеристика четырехступенчатой защиты показаны на рис. 15-33. Три ступени защиты действуют на отключение, четвертая ступень — на сигнал. Каждая ступень имеет пусковое реле (T_1, T_2, T_3, T_4) и свое реле времени (B_1, B_2, B_3, B_4). Пусковые реле питаются от двух фильтров обратной последовательности типа РТФ-2 и реагируют на ток I_2 .

Первая ступень (T_1, B_1) предназначена для отключения к. з. на выводах генератора. Вторая ступень (T_2, B_2) служит для резервирования отключения несимметричных к. з. в сети. Третья ступень (T_3, B_3) является защитой ротора от несимметричных режимов с токами I_2 , при которых ликвидация несимметрии вруч-

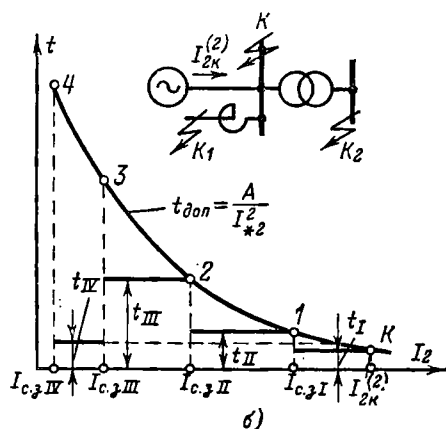
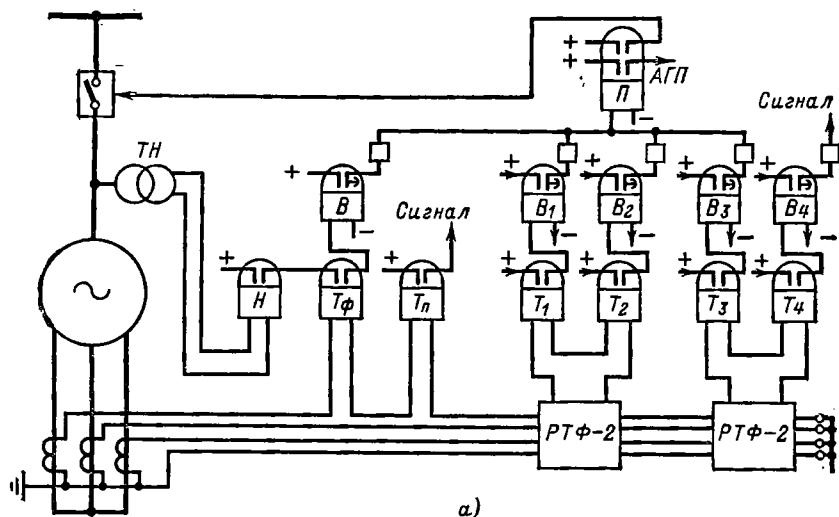


Рис. 15-33. Токовая защита обратной последовательности со ступенчатой характеристикой с приставкой от симметричных к. з.

а — схема; б — характеристика $t = f(I_2)$.

ную невозможна, так как допустимое время относительно мало ($t_{\text{доп}} < 2 \div 3$ мин). Четвертая ступень (T_4, B_4) работает на сигнал, предупреждая дежурного о появлении несимметрии при $I_2 > I_{2\text{длит. доп. макс.}}$. Характеристика защиты приведена на рис. 15-33, б, Завод ЧЭАЗ выпускает защиту со ступенчатой характеристикой типа РТФ-7. Она состоит из двух комплектов, в каждый входит фильтр РТФ-2 и два токовых реле, как показано на рис. 15-33, а.

Такая защита применяется на генераторах с непосредственным охлаждением 50 — 100 — 150 МВт, на 300 МВт и выше — РТФ-6.

Для блокировки защиты от замыканий на землю генератора (§ 15-4, в) устанавливается пятое реле РТ-40/0,6; оно подключается дополнительно к одному из фильтров (на рис. 15-33 не показано).

Выбор уставок (рис. 15-33, б). Исходной для выбора уставок является тепловая характеристика ротора по выражению (15-2), в котором величина A принимается по данным завода соответственно типу генератора (см. рис. 15-2).

Первая ступень. Ток срабатывания первой ступени должен обеспечивать ее надежное действие при двухфазных к. з. на выводах генератора; точка K на рис. 15-33, б. В этом случае наибольший ток обратной последовательности в генераторе будет при работе генератора изолированно от сети. Величина этого тока в относительных единицах

$$I_{2K}^{(2)} = \frac{1}{x_d'' + x_2},$$

где x_d'' — сверхпереходное реактивное сопротивление генератора; x_2 — сопротивление обратной последовательности.

С учетом этого

$$I_{с.з. I} = \frac{I_{2K}^{(2)}}{k_{\text{ч}}}, \quad (15-30)$$

где $k_{\text{ч}}$ — коэффициент чувствительности.

Выдержка времени t_I не должна превышать допустимого времени по условию нагрева ротора при к. з. на выводах генератора. Подставляя в (15-2) $I_{2*} = I_{2\text{к. макс}}^{(2)}$, получаем:

$$t_I = t_{\text{доп}} = \frac{A}{(I_{2\text{к. макс}}^{(2)})^2}.$$

Если это время не удастся согласовать с защитами присоединений отходящих от шин электростанций, то необходимо ограничить зону действия первой ступени так, чтобы она не работала при к. з. за трансформаторами и реакторами отходящих линий. Исходя из этого, в выражении (15-30) допускается принимать $k_{\text{ч}} = 1,2$ при минимальном значении I_{2K} .

Вторая ступень. Выдержка времени t_{II} должна равняться $t_{\text{доп}}$ при $I_{2*} = I_{с.з. I}$ (точка I на рис. 15-33, б), т. е.

$$t_{II} = \frac{A}{I_{с.з. I}^2}. \quad (15-30a)$$

Ток срабатывания выбирается из условия достаточной чувствительности для резервирования защит присоединений, отходящих от генераторных шин:

$$I_{с.з. II} = \frac{I_{2K}}{k_{\text{ч}}}, \quad (15-30б)$$

где I_{2K} — ток обратной последовательности при к. з. в конце зоны (в точке K_I).

Если t_{II} по условию (15-30a) мало и не обеспечивает селективности с защитами линий, отходящих от шин, то зону действия второй ступени приходится ограничивать для обеспечения необходимой селективности, уменьшая $k_{\text{ч}}$.

Если $t_{II} > t$ защит присоединений, отходящих от генераторных шин, то $I_{с.з. II}$ выбирается из условия чувствительности при к. з. в конце резервируемой зоны по (15-30 б), в котором I_{2K} соответствует наименьшему значению

тока I_2 , проходящего по генератору, при двухфазном к. з. в конце присоединения с наибольшим сопротивлением.

Третья зона. Выдержка времени t_{III} выбирается по $t_{доп}$ при $I_{2*} = I_{с.зII}$ (точка 2):

$$t_{III} = t_{доп} = \frac{A}{I_{с.зII}^2}.$$

Ток срабатывания третьей ступени выбирают, исходя из ее назначения — отключать генератор при токах I_2 , при которых $t_{доп} \leq 2 \div 3$ мин. С учетом этого $I_{с.зIII} = \sqrt{\frac{A}{120}}$.

Четвертая ступень действует на сигнал. Защита должна действовать при токе $I_2 > I_{2длит. макс. доп.}$. С учетом этого $I_{с.зIV} = I_{2длит. макс. доп.} = (0,05 \div 0,1) I_{ном.г.}$. Выдержка времени четвертой ступени t_{IV} выбирается минимальной, но больше времени отключения к. з. в сети. Обычно принимается $t_{IV} = 5 \div 9$ с. По выбору уставок см. [Л. 103].

Рассмотренная ступенчатая защита позволяет обеспечить требования к защите от перегрузки и требования по чувствительности и селективности при внешних к. з. Недостатком защиты является многорелейность, недостаточное использование перегрузочной возможности генератора и неинтегральность характеристики, но несмотря на это многоступенчатая защита является лучшей из практически осуществимых вариантов этой защиты.

На генераторах 60 МВт и меньшей мощности по соображениям упрощения применяется двухступенчатая защита. Первая ступень действует на отключение с $t_1 = t_{доп}$ при к. з. в точке К на генераторных шинах и срабатывает при токах I_2 , при которых $t_{доп} < 2$ мин, отсюда $I_{с.зI} = A/120$. Вторая ступень работает на сигнал с уставками сигнального комплекта четырехступенчатой защиты.

Защита от внешних трехфазных к. з. и симметричных перегрузок. Защита обратной последовательности не действует при трехфазных к. з. и симметричных перегрузках, поскольку при этом виде повреждения и ненормальном режиме $I_2 = 0$. В связи с этим для отключения трехфазных к. з. необходимо предусматривать дополнительный комплект защит. Он выполняется в виде однофазной максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения (рис. 15-33, а). В дополнительный комплект входят токовое реле T_ϕ , включенное на ток одной из фаз, и реле минимального напряжения H , включенное на одно из междупазных напряжений. Оба реле надежно реагируют на трехфазные к. з., поскольку изменение тока и напряжения во всех фазах имеет в этом случае одинаковый характер. Защита действует с выдержкой времени, для чего предусмотрено реле времени В. Поведение и чувствительность комплекта и защиты от трехфазных к. з. во всем аналогичны поведению и чувствительности максимальной защиты, рассмотренной в § 15-5, б.

Для защиты от симметричных перегрузок устанавливается токовое реле T_π в одной фазе согласно § 15-5, в.

Уставки реле комплекта от трехфазных к. з. выбираются так же, как и для максимальной защиты с пуском от реле минимального напряжения (§ 15-5, б).

д) Оценка защит от сверхтоков и несимметричных режимов

Максимальная защита с пуском по напряжению является достаточно простой защитой от внешнего к. з. Она не действует при перегрузках, не сопровождающихся значительным понижением напряжения, что является ее положительным свойством. Существенным дефектом защиты является недостаточная чувствительность к удаленным и особенно несимметричным к. з. на присоединениях, отходящих от генераторных шин. По своему принципу действия максимальная защита не может реагировать на несимметричные режимы, если они не сопровождаются увеличением токов до $I_{с.з}$ и понижением напряжения на зажимах генератора до $U_{с.з}$. В настоящее время максимальная защита с пуском по напряжению применяется на генераторах с косвенным охлаждением мощностью до 30 МВт включительно, где не требуется защит от несимметричных режимов. На генераторах большей мощности она используется в качестве защиты от симметричных к. з. в однофазном исполнении (см. § 15-5, г). Наилучшей следует признать схему с комбинированным пуском, которая обладает значительно большей чувствительностью (по напряжению) при несимметричных к. з. и несколько более чувствительна к симметричным повреждениям.

На генераторах 60 МВт и больше в качестве защиты от несимметричных режимов должна применяться токовая защита обратной последовательности в сочетании с защитой от внешних трехфазных к. з., выполняемой в виде однофазной приставки. Защита I_2 обладает высокой чувствительностью к несимметричным к. з., не реагирует на нагрузку и качания. Защита обратной последовательности с зависимой характеристикой обеспечивает достаточно совершенную защиту ротора от нагрева в несимметричных режимах и должна применяться на мощных генераторах с непосредственной системой охлаждения.

15-6. ЗАЩИТА ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ОТ ПОВЫШЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Выше указывалось, что при сбросе нагрузки на гидрогенераторах напряжение на их зажимах резко возрастает и достигает 150% номинального и больше. Такое напряжение опасно для изоляции статора и должно быть ликвидировано за несколько секунд. При правильно выбранных параметрах регулирования возбуждения и наличии специальных устройств для быстрого развозбуждения генератора повысившееся напряжение удастся снизить до нормального в течение допустимого времени. Однако в случае неисправности этих устройств повышенное напряжение останется, создавая опасность повреждения генератора. Поэтому на гидро-

генераторах устанавливается защита от повышения напряжения (рис. 15-34), действующая на отключение выключателя и АГП генератора. Защита состоит из одного реле напряжения H и реле времени B .

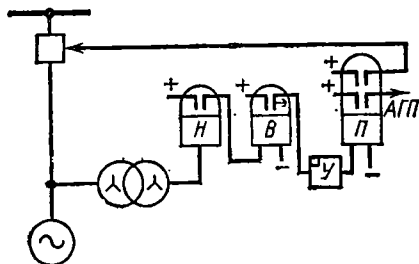


Рис. 15-34. Защита от повышения напряжения гидрогенератора.

Напряжение срабатывания защиты выбирается равным $U_{с.з.} = (1,5 \div 1,7) U_{ном}$, поскольку такое напряжение признается опасным для генератора даже кратковременно. На реле времени защиты устанавливается небольшая выдержка времени 0,5—1 с.

Как показывает опыт, за это время регулирование возбуждения успевает снизить повысившееся напряжение до значения, меньшего $U_{воз}$ реле H , что предупреждает срабатывание защиты.

15-7. ЗАЩИТА РОТОРА

а) Защита обмотки ротора от замыкания на корпус (на землю) во второй точке

При появлении замыкания на землю в одном месте обмотки ротора турбогенераторы часто оставляют в работе, поскольку через место повреждения ток не проходит и напряжение на зажимах ротора остается нормальным.

Двойное замыкание на землю (рис. 15-35, а) представляет опасность для генератора (см. § 15-1, а),

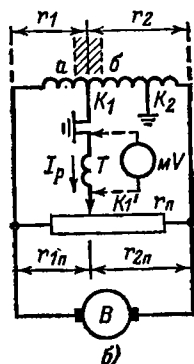
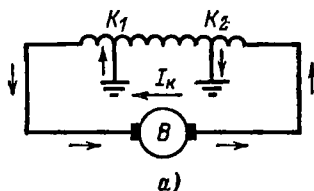


Рис. 15-35. Замыкание на землю обмотки ротора в двух точках (а) и принцип действия защиты обмотки ротора от замыкания на землю в двух точках (б).

и поэтому по «Правилам электротехнических установок» при появлении одного замыкания на землю на оставленном в работе генераторе должна включаться защита от второго замыкания на землю. Обычно на станции имеется один комплект защиты, при-

способленный к удобному и быстрому подсоединению его к любому генератору станции.

Принцип действия защиты от второго замыкания на землю показан на рис. 15-35, б. Параллельно обмотке ротора включается потенциометр r_n . На потенциометре находится точка K'_1 , потенциал которой равен потенциалу места первого замыкания в обмотке ротора (точка K_1). Между точкой K'_1 и землей включается обмотка токового реле T .

Схема представляет собой четырехплечий мостик с реле в его диагонали. При равенстве потенциалов точки повреждения K_1 и точки потенциометра K'_1 сопротивления плеч моста удовлетворяют условию $r_1/r_2 = r_{1n}/r_{2n}$, при этом ток в реле T равен нулю и защита не действует. В случае появления второго замыкания на землю, например в точке K_2 , подобранное соотношение сопротивлений плеч моста нарушается, вследствие чего потенциалы точек K'_1 и K_1 становятся неравными и в диагонали моста (в реле) появляется ток, величина которого зависит от степени небаланса плеч. Если ток в реле $I_p > I_{c.p}$, то защита приходит в действие.

Чем дальше от точки K_1 возникает второе повреждение K_2 , тем больше будет ток в реле. Защита имеет мертвую зону, расположенную вблизи точки K_1 (между точками a и b). Если второе замыкание (K_2) окажется в пределах этой зоны, то ток I_p будет меньше $I_{c.p}$ и защита не сможет действовать. Точка K'_1 на потенциометре защиты находится опытным путем по милливольтметру постоянного тока, который измеряет напряжение на обмотке реле T . Движок потенциометра передвигается до тех пор, пока показание вольтметра не станет равным нулю, что указывает на балансировку плеч и отсутствие тока I_p .

Принципиальная схема защиты показана на рис. 15-36. При замыкании на землю в одной точке, даже при наличии баланса плеч, через реле непрерывно протекает переменный ток I' , обусловленный неравномерностью воздушного зазора между статором и ротором. Вследствие этой неравномерности величина магнитного потока, пронизывающего обмотку ротора, пульсирует при вращении ротора. Эта пульсация потока вызывает в обмотке ротора э. д. с., обуславливающую появление переменного тока I' в цепи реле. Под влиянием тока I' реле может срабатывать при отсутствии второго замыкания.

Для предупреждения неправильной работы защиты последовательно с обмоткой реле включается дроссель 2. Сопротивление дросселя подбирается таким образом, чтобы величина переменного тока I' была меньше $I_{c.p}$ реле. Для постоянного тока сопротивление дросселя мало, поэтому оно не оказывает существенного влияния на величину этого тока.

Для повышения надежности отстройки защиты от переменного тока I' параллельно обмотке реле I включается конденсатор C , через который замыкается большая часть тока I' . При появлении второго замыкания на землю весь ток повреждения, являющийся

практики чувствительностью. Расчет параметров защиты приведен в [Л. 2]. Промышленность выпускает комплектное устройство КЗР-2, выполненное по схеме, показанной на рис. 15-37.

Для повышения чувствительности в КЗР-2 в качестве реагирующего органа вместо реле I (рис. 15-36) используются два поляризованных реле $ПР1$ и $ПР2$. Одно из них действует при токе повреждения, когда потенциал точки K_1 больше K'_1 , а второе — при токе обратного направления, когда потенциал точки K'_1 больше K_1 (рис. 15-35, б).

Оценка защиты. Недостатками защиты являются возможность неправильного действия ее при к. з. в цепи статора, наличие мертвой зоны и непригодность схемы в случае, если первое замыкание на землю произошло на конце обмотки ротора.

Несмотря на несовершенство схемы, она имеет широкое распространение на генераторах ввиду своей простоты. Опыт эксплуатации показал, что при повреждениях в роторе рассмотренная защита действует четко.

б) Защита ротора от перегрузки током

Мощные турбогенераторы 100 МВт и выше с непосредственным охлаждением проводников обмоток статора и ротора имеют в отличие от генераторов малой мощности меньшую перегрузочную способность, поэтому при перегрузках ротора, когда $I_{\text{рот}} > I_{\text{рот, ном}}$, обмотка ротора мощных турбогенераторов нагревается быстрее и их тепловая характеристика $t_d = f(I_{\text{рот}})$ идет ниже, чем у машин малой мощности. Так, например, у небольших турбогенераторов при двукратном токе в роторе допустимое время $t_{\text{доп}} \geq 1$ мин, в то время как для мощных машин типа ТВФ $t_{\text{доп}} = 30$ с, а для ТВВ и ТГВ — 20 с (см. табл. 15-3). За такой промежуток времени (20—30 с) дежурный персонал не сможет принять необходимых мер по ликвидации перегрузки или отключению генератора.

В связи с этим для мощных турбогенераторов необходима автоматически действующая защита ротора от перегрузки его током, предупреждающая повреждение изоляции обмотки ротора от чрезмерного нагрева ее повышенным током.

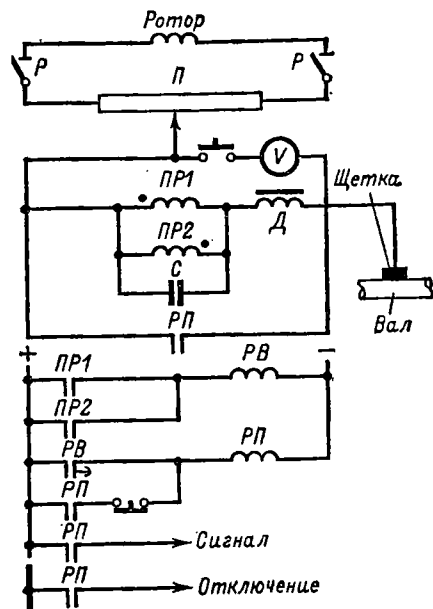


Рис. 15-37. Защита ротора от замыкания на землю в двух точках типа КЗР-2.

Перегрузка ротора возникает при работе регулятора или устройства форсировки возбуждения. Максимальное значение перегрузки определяется кратностью тока форсировки возбуждения. В Советском Союзе максимальное значение тока форсировки возбуждения («потолок» возбуждения) принимается равным $2I_{\text{рот. ном}}$. Продолжительная форсировка, опасная для ротора, может возникнуть при недостатке реактивной мощности генераторов для восстановления нормального напряжения в системе или при неисправности регулятора возбуждения генератора, вызывающей увеличение тока в роторе.

Защита с зависимой от тока выдержкой времени. Наиболее совершенной защитой от перегрузки ротора является токовая

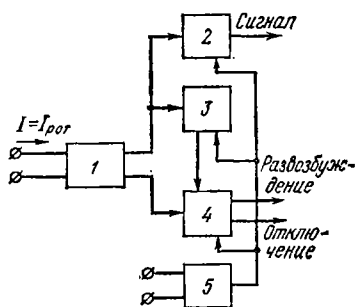


Рис. 15-38. Структурная схема зависимой защиты ротора от перегрузки (типа РЗР-1).

защита с интегрально зависимой характеристикой $t_a = f(I_p)$, соответствующая перегрузочной характеристике ротора. Опытные экземпляры такой защиты типа РЗР-1 изготовлены заводом ЧЭАЗ и проходят эксплуатационную проверку. Защита РЗР-1 выполнена на полупроводниках. Характеристика времени действия защиты соответствует перегрузочной характеристике ротора и выражается приближенно уравнением

$$t_a = t_{\text{доп}} = \frac{B}{I_{* \text{рот}}^n - 1}, \quad (15-31)$$

где $I_{* \text{рот}} = I_{\text{рот}} / I_{\text{рот. ном}}$; B — постоянная величина; n — величина, постоянная для определенного диапазона тока $I_{* \text{рот}}$, она колеблется от четырех до двух. Основной элемент защиты (рис. 15-38) — зависимый и состоит из преобразователя, преобразующего $I_{\text{рот}}$ в $I = I_{* \text{рот}}^n$, и интегрирующего элемента, создающего зависимую выдержку времени t_a по выражению (15-31) с учетом изменения тока $I_{\text{рот}}$ в течение времени действия защиты t_a . В качестве интегратора используется конденсатор, процесс заряда которого приближенно совпадает с процессом нагрева обмотки ротора. Защита состоит из двух органов: сигнального 2 — действующего при $I_{\text{рот}} > I_{\text{рот. ном}}$ на сигнал, и интегрально зависимого 4 — действующего с первой ступенью времени на развозбуждение и со второй — на отключение генератора.

Орган с интегрально зависимой выдержкой времени имеет пусковое реле 3, разрешающее действовать этому органу при увеличении тока ротора до определенного значения: $I_{\text{рот}} = I_{\text{с.з.}}$.

Пусковое реле выполнено в виде схемы сравнения величины (см. § 2-15, рис. 2-45) напряжения $U_p \equiv I_{\text{рот}}$ с величиной опорного напряжения $U_{\text{оп}}$. Разность $U_p - U_{\text{оп}}$ подводится к магнито-

электрическому реле, которое срабатывает при $U_p > U_{оп}$, т. е. при $I_{рот} > I_{с.з.}$

Зависимый орган состоит из двух указанных выше элементов: преобразователя и интегратора. Оба элемента выполняются по схемам, аналогичным рассмотренным в § 15-5, г. Сигнальное реле выполняется так же, как и пусковое реле; для создания выдержки времени применяется выносное реле времени.

Защита питается током $I \equiv I_{рот}$, получаемым от трансформатора тока постоянного тока I типа И-514. Трансформатор постоянного тока уменьшает ток ротора до значения, соответствующего параметрам защиты.

Ток I (от трансформатора тока I) поступает в разделительный элемент, где он направляется по двум независимым каналам: по одному — в сигнальное и пусковое реле 2 и 3, по второму — в орган с зависимой выдержкой времени 4. Для питания логической части схемы защиты, выполненной на полупроводниковых приборах, служит устройство 5.

Защита с независимой выдержкой времени. До окончательной разработки и серийного выпуска зависимого реле применяется упрощенная, менее совершенная схема защиты с независимой характеристикой, реагирующей на напряжение $U_{рот}$ на зажимах ротора. Это напряжение пропорционально $I_{рот}$, так как $U_{рот} = I_{рот}R_{рот}$, где $R_{рот}$ — сопротивление обмотки ротора.

Схема подобной защиты показана на рис. 15-39. Пусковое реле напряжения $РН$ питается от делителя напряжения Π , включенного параллельно обмотке ротора P , поэтому напряжение на зажимах реле $U_p \equiv U_{рот}$ и $I_{рот}$.

Защита выполняется с двумя реле времени PB_1 и PB_2 . Первое с $t_{з1} = t_{доп}$ посылает импульс на отключение генератора. Второе действует на снижение или снятие форсировки возбуждения с $t_{з2} = t_{з1} - \Delta t$.

Уставки защиты. Защита должна срабатывать при таком токе ротора, при котором ликвидация перегрузки дежурным персоналом невозможна из-за малого значения $t_{доп}$. Принимая последнее равным 1,5—2 мин, по тепловой характеристике ротора (табл. 15-2) находим, что защита должна действовать при $I_{рот} = (1,4 \div 1,5) I_{рот.ном}$. Исходя из этого

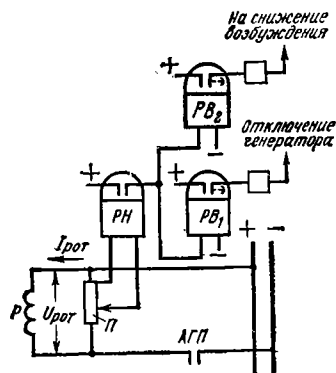
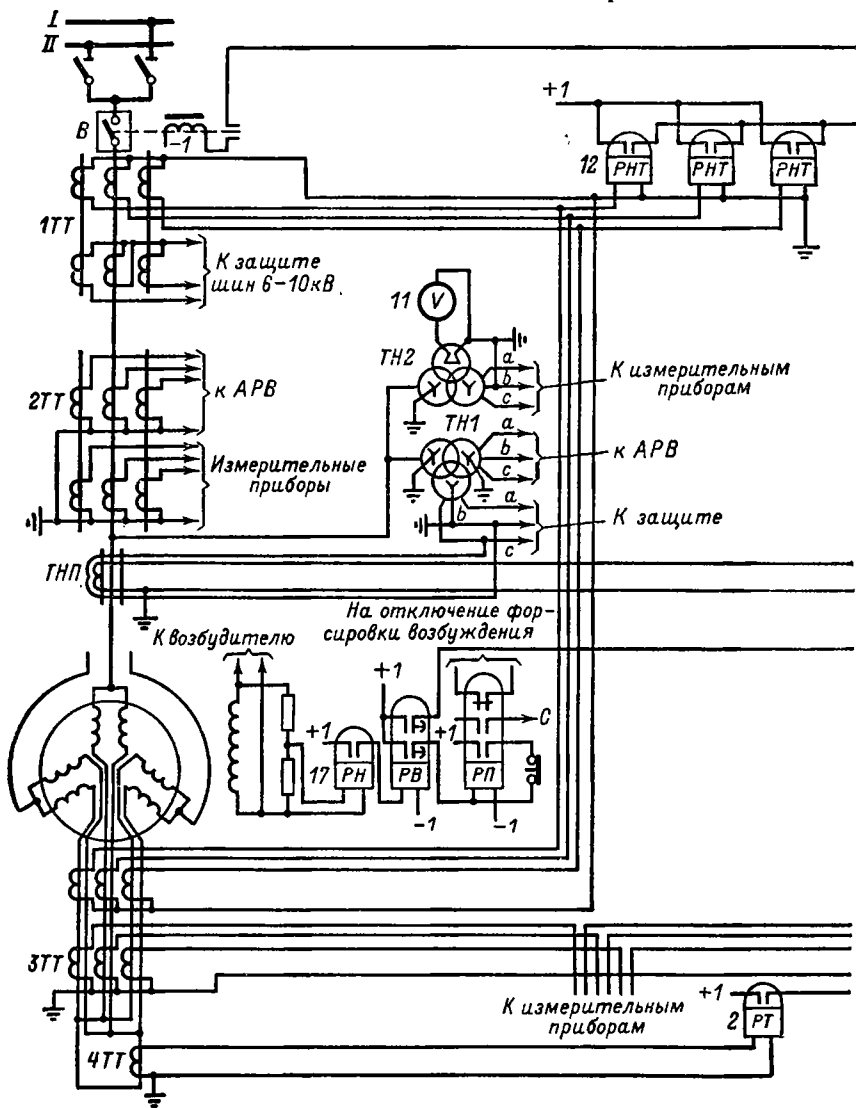


Рис. 15-39. Защита ротора от перегрузки с независимой от тока выдержкой времени.

$$U_{с.з.} = 1,5 I_{рот.ном} R_{рот}. \quad (15-32)$$

Выдержка времени PB_1 должна удовлетворять условию $t_{з1} \leq t_{доп}$ при максимальной возможной перегрузке.

Последняя равна полной форсировке возбуждения, которая, как указывалось, в общем случае достигает $2I_{\text{рот.ном.}}$. По тепловой



характеристике ротора определяется, что при этом токе $t_{\text{доп}} \approx \approx 20 \div 30$ с. Отсюда $t_{31} = 20 \div 30$ с.

На генераторах с ионным и высокочастотным возбуждением ротор питается выпрямленным током. Кривая этого тока имеет

Для исключения ложной работы защиты при кратковременных перегрузках, не опасных для ротора, необходимо во всех схемах защиты иметь быстрый возврат пускового реле при спаде тока $I_{\text{рот}}$ до величины, близкой к $I_{\text{с.з.}}$. Чтобы обеспечить это условие, пусковое реле защиты должно иметь коэффициент возврата, близкий к 1. Обычно добиваются $k_{\text{воз}} = 0,95 \div 0,98$.

15-8. ПОЛНАЯ СХЕМА ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА

В качестве примера на рис. 15-40 приведена полная схема защиты генератора средней мощности 60—100 тыс. кВт. Для защиты от повреждений в статоре генератора предусмотрены: продольная дифференциальная защита 1 в трехфазном исполнении с реле 12 типа РНТ-565; поперечная дифференциальная защита 2; защита от замыканий на землю с ТНП с подмагничиванием с грубым и чувствительным реле 3 и 4. В качестве защиты от внешних трехфазных к. з. устанавливается однофазная максимальная токовая защита 5 с блокировкой минимального напряжения 6. От несимметричных перегрузок и внешних к. з. предусмотрена трехступенчатая защита обратной последовательности реле 7, 8 и 9. Защита от симметричной перегрузки осуществлена токовым реле 10, действующим на сигнал. Дополнительно для контроля за изоляцией статора при работе генератора на холостом ходу предусмотрен вольтметр 11, включенный на напряжение $3U_0$ трансформатора напряжения ТН2.

Блокировка защиты от замыкания на землю осуществляется промежуточным реле 15. Это реле пускается при несимметричных к. з. от реле 9, а при симметричных — от реле 5. Для задержки возврата блокировки после отключения к. з. обмотка промежуточного реле 15 шунтируется конденсатором С.

Защита ротора от перегрузки выполняется с помощью реле напряжения 17 и реле времени РВ. Для повышения надежности в схеме предусмотрены два выходных промежуточных реле 18 и 19. На одно (18) действуют основные защиты, на второе (19) — резервные защиты генератора. Кроме того предусмотрено промежуточное реле 14, действующее на отключение секционного выключателя.

В выходных цепях каждой защиты устанавливаются серийные указательные реле 13, фиксирующие действие защит. При одновременном действии двух или трех защит ток, потребляемый промежуточным реле 18, делится между тремя указательными реле поровну и может оказаться недостаточным для их работы.

Для увеличения тока в указательных реле до значения, достаточного для их действия в указанном случае, параллельно обмотке реле 18 включено сопротивление.

В токовых цепях дифференциальной защиты предусматривается испытательный блок, позволяющий без пересоединения в цепях произвести измерение токов небаланса в дифференциаль-

ных реле. Токовые цепи всех остальных защит заводятся на специальные испытательные зажимы, устанавливаемые на панелях защиты и позволяющие производить необходимые измерения без разрыва цепей.

15-9. ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

а) Включение синхронных компенсаторов в сеть

Синхронный компенсатор (СК) является генератором реактивной мощности. Он устроен и работает как синхронный двигатель, генерирующий реактивный ток. Конструктивное выполнение синхронных компенсаторов сходно с генераторами. Важной особенностью компенсаторов, которую надлежит учитывать при рассмотрении защиты, является их пуск. Наиболее простым способом пуска СК, принятым в СССР, является асинхронный пуск. Он осуществляется включением СК на напряжение сети при отсутствии возбуждения в цепи ротора. В этом случае СК ведет себя как короткозамкнутый асинхронный двигатель. После того как скорость вращения ротора приблизится к синхронной, включается возбуждение и СК втягивается в синхронизм.

В момент включения компенсатора на напряжение сети в нем появляется бросок пускового тока, как и в обычном асинхронном двигателе. Для уменьшения этого тока мощные компенсаторы пускаются через специальный реактор P (рис. 15-41), который шунтируется выключателем $B2$ после затухания пускового тока.

Так же как и генератор, синхронные компенсаторы снабжаются автоматами гашения поля АГП, разрывающими цепь возбуждения и замыкающими обмотку ротора на сопротивление.

б) Защита СК от внутренних повреждений

В компенсаторах возможны такие же повреждения, как и в генераторах. Основными защитами от внутренних повреждений СК являются дифференциальная защита и защита от замыканий на землю, выполняемые по приведенным выше схемам с теми же параметрами. На СК, имеющих пусковой реактор P , последний желательно включать в зону дифференциальной защиты.

Защита от витковых замыканий может выполняться на компенсаторах с параллельными ветвями в фазах, но по соображе-

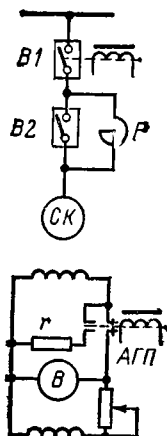


Рис. 15-41. Схема включения в сеть синхронного компенсатора.

ниям упрощения эта защита обычно не применяется. Все защиты от внутренних повреждений СК должны отключать его от сети и снимать возбуждение отключением АГП.

в) Защита СК от ненормальных режимов

Защита минимального напряжения. При исчезновении напряжения компенсатор лишается питания и останавливается. Для предотвращения подачи напряжения на неподвижный СК при наличии на нем возбуждения предусматривается защита минимального напряжения (рис. 15-42). Эта защита должна или отключить остановившийся СК от сети, или подготовить его к самозапуску, отключая АГП и дешунтируя реактор (если он имеется). Самозапуск СК предусматривается на

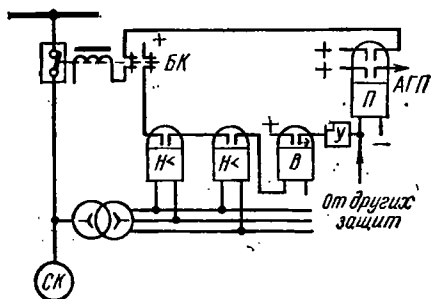


Рис. 15-42. Защита минимального напряжения синхронного компенсатора.

подстанциях без дежурного персонала и подразумевает наличие автоматики, включающей АГП после появления напряжения и разворота СК. Защита минимального напряжения состоит из реле минимального напряжения *Н* и реле времени *В* (рис. 15-42). Для выполнения поставленной задачи — отключение СК при исчезновении напряжения — достаточно одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение. Но с целью уменьшения вероятности неправильного отключения синхронного компенсатора при неисправности в цепях напряжения целесообразно устанавливать два реле минимального напряжения, включаемые или на разные трансформаторы напряжения, или на разные междупазные напряжения одного и того же трансформатора, как показано на рис. 15-42. Контакты обоих реле соединяются последовательно. При исчезновении напряжения, питающего СК, оба реле срабатывают. В случае же нарушения цепи одной из фаз трансформатора напряжения подействует только одно из двух реле и цепь защиты останется разомкнутой. Схема питания от разных трансформаторов напряжения надежнее, но сложнее.

Если оба реле *Н* питаются от трансформатора напряжения СК (рис. 15-42), то цепь оперативного тока защиты должна заводиться через блокировочные контакты *БК* главного выключателя, автоматически выводящие защиту из действия при отключенном СК. При отсутствии такой блокировки защита минимального напряжения приходила бы в действие в том случае, когда СК отключен от сети, и не позволяла бы произвести обратное его включение.

Напряжение срабатывания реле минимального напряжения выбирается возможно меньшим с тем, чтобы отключение СК могло происходить только при глубоких понижениях напряжения, могущих вызвать его остановку. «Правила эксплуатации электро-технических установок» рекомендуют принимать $U_{с.р} = 0,4 U_{ном.}$

Уставка по времени должна превосходить наибольшие выдержки времени защит, установленных в сети, с которой связан компенсатор. Обычно уставка принимается равной 8—10 с.

Защита от внешних к. з., работающая при повреждении на шинах или неотключившемся присоединении, на синхронных компенсаторах не ставится, так как после отключения источников питания СК теряет напряжение, снижает свои обороты и ток, посылаемый им в место к. з., затухает. Следует также иметь в виду, что при глубоком снижении напряжения во время внешнего к. з. может подействовать защита минимального напряжения, которая произведет отключение СК.

Защита от перегрузки. Длительная перегрузка синхронного компенсатора возможна при продолжительном понижении напряжения, вызывающем действие регулятора напряжения и форсировку возбуждения СК. Для устранения этой перегрузки рекомендуется устанавливать специальное разгрузочное устройство, снижающее ток возбуждения и отключающее регулятор. Это устройство реагирует на ток одной из фаз и действует только в том случае, если перегрузка длится долго — примерно 1 мин и больше.

Восстановление нормальной работы регулятора осуществляется вручную или автоматически при помощи реле напряжения, фиксирующего восстановление нормального уровня напряжения.

Кроме разгрузочного устройства можно устанавливать сигнализацию от перегрузки, осуществляемую, как и на генераторе, при помощи одного токового реле.

ГЛАВА ШЕСТНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

16-1. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ, ВИДЫ ЗАЩИТ И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

а) Виды повреждений трансформаторов и типы защит ¹

Виды повреждений. Основными видами повреждений в трансформаторах и автотрансформаторах являются:

а) замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток;

¹ Все изложенное ниже в равной мере относится к трансформаторам и автотрансформаторам. Особенности защиты автотрансформаторов будут оговариваться особо.

б) замыкания в обмотках между витками одной фазы (так называемые витковые замыкания);

в) замыкания на землю обмоток или их наружных выводов;

г) повреждение магнитопровода трансформаторов, приводящее к появлению местного нагрева и «пожару стали».

Опыт показывает, что к. з. на выводах и витковые замыкания в обмотках трансформаторов происходят наиболее часто.

Междуфазные повреждения внутри трансформаторов возникают значительно реже. В трехфазных трансформаторах они хотя и не исключены, но маловероятны вследствие большой прочности междуфазной изоляции. В трансформаторных группах, составленных

из трех однофазных трансформаторов, замыкания между обмотками фаз практически невозможны.

При витковых замыканиях токи, идущие к месту повреждения от источников питания, могут быть небольшими. Так, например, если принять, что в замкнувшихся накоротко витках w_α (рис. 16-1) ток к. з.

Рис. 16-1. Токи при витковом коротком замыкании в обмотках трансформатора.

равен $I_{k\alpha}$, то ток повреждения I_k , проходящий от источника питания, можно найти из уравнения баланса н. с. трансформатора: $I_k w_1 = I_{k\alpha} w_\alpha$, откуда $I_k = \frac{w_\alpha}{w_1} I_{k\alpha}$. Отношение $w_\alpha / w_1 < 1$, следовательно, ток $I_k < I_{k\alpha}$. Чем меньше число замкнувшихся витков w_α , тем меньше будет ток I_k , приходящий из сети.

В случае замыкания на землю обмотки трансформатора, подключенной к сети с малым током замыкания на землю, ток повреждения определяется величиной емкостного тока сети. Поэтому защиты трансформатора, предназначенные для действия при витковых замыканиях, а также при замыканиях на землю в обмотке, работающей на сеть с изолированной нейтралью, должны обладать высокой чувствительностью.

Для ограничения размера разрушения защита от повреждений в трансформаторе должна действовать б ы с т р о. Повреждения, сопровождающиеся большим током к. з. I_k , должны отключаться без выдержки времени с $t = 0,05 \div 0,1$ с.

З а щ и т ы о т п о в р е ж д е н и й. В качестве таких защит применяются токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты. За рубежом применяется довольно простая защита от замыкания на корпус (кожух) трансформатора.

6) Ненормальные режимы и защита от них

Наиболее частым ненормальным режимом работы трансформаторов является появление в них с в е р х т о к о в, т. е. токов, превышающих номинальный ток обмоток трансформатора. С в е р х-

токи в трансформаторе возникают при внешних к. з., качаниях и перегрузках. Последние возникают вследствие самозапуска электродвигателей, увеличения нагрузки в результате отключения параллельно работающего трансформатора, автоматического подключения нагрузки при действии АВР и т. п.

Внешние к. з. При внешнем к. з., вызванном повреждением на шинах трансформатора или неотключившимся повреждением на отходящем от шин присоединении, по трансформатору проходят токи к. з. $I_k > I_{ном}$, которые нагревают его обмотки сверх допустимого значения, что может привести к повреждению трансформатора. В связи с этим трансформаторы должны иметь защиту от внешних к. з., отключающую трансформатор для прекращения протекающего по нему тока повреждения. Поскольку внешнее к. з. сопровождается понижением напряжения в сети, защита должна действовать с минимальной выдержкой времени, необходимой для селективности.

Защита от внешних к. з. осуществляется при помощи максимальной токовой защиты, максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения, токовой защиты нулевой последовательности и защиты обратной последовательности. В зону действия защиты от внешних к. з., как правило, должны входить шины подстанций (I участок защиты) и все присоединения, отходящие от этих шин (II участок защиты). Защиты от сверхтоков являются также резервными от повреждений в трансформаторе.

Перегрузка. Перегрузки обычно не сопровождаются значительным понижением напряжения в сети. Поэтому требование ко времени действия защиты от перегрузки определяется только нагревом изоляции обмоток. Масляные трансформаторы допускают длительную перегрузку по току на 5%. В аварийных режимах допускается кратковременная перегрузка в следующих пределах [Л. 100]:

Кратность перегрузки $I_{наг}/I_{ном}$	1,3	1,6	1,75	2	3
Допустимое время перегрузки, $t_{доп}$, мин	120	45	20	10	1,5

Из таблицы видно, что перегрузку порядка $(1,5 \div 2) I_{ном}$ можно допускать в течение значительного времени, измеряемого десятками минут. Мощные трансформаторы имеют меньшее $t_{доп}$.

Наиболее часто возникают кратковременные, самоликвидирующиеся перегрузки, неопасные для трансформатора ввиду их непродолжительности. Например, перегрузки, вызванные самозапуском электродвигателей или толчкообразной нагрузкой (электропоезда, подъемники и т. п.). Отключения трансформатора при таких перегрузках не требуется.

Более длительные перегрузки, вызванные, например, автоматическим подключением нагрузки от АВР, отключением параллельно работающего трансформатора и т. п., могут быть ликвид-

рованы обслуживающим персоналом, который имеет для этого достаточное время. На подстанциях без дежурного персонала ликвидация длительной перегрузки должна производиться автоматически от защиты отключением менее ответственных потребителей или перегрузившегося трансформатора.

Таким образом, защита трансформатора от перегрузки должна действовать на отключение только в том случае, когда перегрузка не может быть устранена персоналом или автоматически. Во всех остальных случаях защита должна действовать на сигнал или производить автоматическим способом его разгрузку.

З а щ и т а о т п е р е г р у з к и выполняется, как правило, реагирующей на ток.

Повышение напряжения. К числу опасных для трансформаторов ненормальных режимов, возникающих в сетях 500—750 кВ, относится повышение напряжения. Оно возникает при одностороннем отключении длинных линий с большой емкостной проводимостью или при резонансе, вызванном определенным сочетанием емкости линии и индуктивности шунтирующих реакторов.

Повышение напряжения вызывает увеличение магнитной индукции в магнитопроводе трансформатора, вследствие чего происходит возрастание тока намагничивания и вихревых токов. Эти токи нагревают обмотку и сердечник трансформатора, что может привести к повреждению изоляции обмоток и «пожару железа» сердечника. Чем больше уровень повышения напряжения, тем меньше время $t_{доп}$, в течение которого оно допускается.

в) Особенности автотрансформаторов

Релейная защита трансформаторов и автотрансформаторов выполняется однотипно. Однако автотрансформаторы имеют некоторые особенности, которые необходимо учитывать при расчете, а в отдельных случаях и при выполнении их защит.

Для сравнения на рис. 16-2, а и б представлены схемы однофазного понижающего трансформатора и автотрансформатора. Последний можно рассматривать как трансформатор, у которого вторичная обмотка ax совмещена с первичной AX . Распределение токов в автотрансформаторе и трансформаторе различно [Л.29, 112].

В трансформаторе первичный ток I_1 проходит по первичной обмотке w_1 , а вторичный ток I_2 — по вторичной обмотке w_2 .

В автотрансформаторе первичный ток I_1 проходит только по части первичной обмотки автотрансформатора $w_1 - w_2$, называемой последовательной (обмотка aA). Во вторичной обмотке w_2 , называемой общей, проходит ток $I_{общ} = I_2 - I_1$, меньший, чем во вторичной обмотке трансформатора на величину тока I_1 . Вторичным током автотрансформатора является ток $I_2 = I_1 + I_{общ}$.

Ниже отмечены особенности автотрансформатора, имеющие значения для релейной защиты.

1. В отличие от трансформаторов автотрансформаторы характеризуются двумя значениями мощности: *проходной* $S_{\text{прох}}$, называемой номинальной мощностью, и *расчетной* $S_{\text{расч}}$, называемой также типовой.

Проходной называется предельная рабочая мощность, передаваемая с первичной на вторичную сторону трансформатора или автотрансформатора:

$$S_{\text{прох}} = U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (16-1)$$

Расчетной $S_{\text{расч}}$ называется мощность, по которой рассчитываются параметры обмоток и магнитопровода трансформатора и автотрансформатора. Она определяется токами, проходящими по обмотке, и напряжениями на их выводах, т. е. $S_{\text{расч}} = U_{\text{обм}} I_{\text{обм}}$.

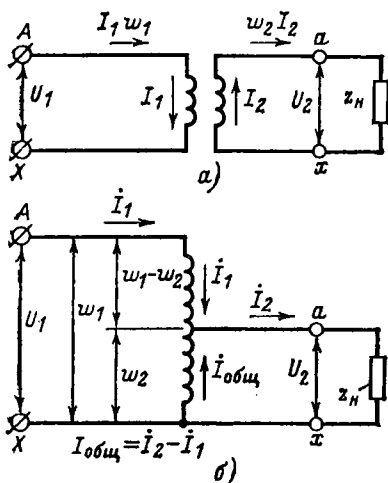


Рис. 16-2. Токораспределение в обмотках трансформатора (а) и автотрансформатора (б).

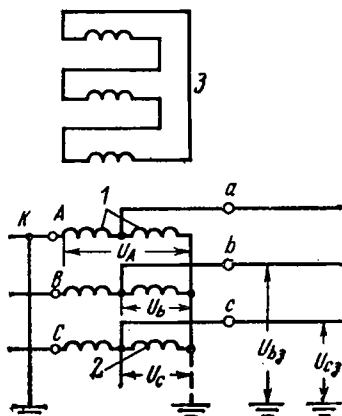


Рис. 16-3. Повышение напряжения в сети среднего напряжения незаземленного автотрансформатора при однофазном к. з. на стороне высшего напряжения.

Расчетная мощность общей части обмотки $S_{\text{общ}} = U_2 (I_2 - I_1)$, а последовательной части $S_{\text{посл}} = (U_1 - U_2) I_1$. Сопоставляя оба выражения, можно установить, что $S_{\text{общ}} = S_{\text{посл}}$. Это означает, что общая и последовательная обмотки автотрансформатора должны рассчитываться по одной и той же расчетной мощности:

$$S_{\text{расч}} = I_1 (U_1 - U_2) = I_1 U_1 \left(1 - \frac{U_2}{U_1}\right) = S_{\text{прох}} \left(1 - \frac{1}{n_a}\right) = S_{\text{прох}} k_{\text{в}}, \quad (16-2)$$

где $S_{\text{прох}} = I_1 U_1$ — проходная мощность; n_a — коэффициент трансформации автотрансформатора, равный $U_1/U_2 = w_1/w_2$; $k_{\text{в}}$ — коэффициент выгоды, показывающий, во сколько раз $S_{\text{расч}}$, определяющая размеры автотрансформатора, меньше $S_{\text{прох}}$, номинальной мощности автотрансформатора,

$$k_{\text{в}} = \left(1 - \frac{1}{n_a}\right) \quad (16-3)$$

или с учетом значения n_a

$$k_{\text{в}} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{w_1 - w_2}{w_1}.$$

Трансформатор такой же номинальной мощности рассчитывается по $S_{\text{прох}}$, т. е. по мощности в $1/k_{\text{в}}$ раз большей, чем автотрансформатор.

В результате этого размеры магнитопровода и обмоток автотрансформатора меньше, чем у трансформатора равной мощности, а ток намагничивания автотрансформатора при расчете параметров защиты определяется по $S_{расч}$.

2. В автотрансформаторе вторичная цепь электрически связана с первичной, поэтому при замыкании на землю одной фазы в сети высшего напряжения автотрансформатора потенциал (по отношению к земле) неповрежденных фаз в сети среднего напряжения повышается по отношению к земле на величину фазного напряжения сети высшего напряжения (рис. 16-3). Например, напряжение фазы b относительно земли на стороне среднего напряжения $U_{bз} = \dot{U}_A + \dot{U}_b$, фазы c $U_{сз} = \dot{U}_A + \dot{U}_c$.

Для предупреждения такого повышения напряжений нейтраль автотрансформатора должна обязательно заземляться, как показано на рис. 16-3.

3. Трехфазные силовые автотрансформаторы дополняются третьей обмоткой, соединенной в треугольник (обмотка 3 на рис. 16-3). Эта обмотка служит для компенсации третьих гармоник магнитных потоков, а следовательно, и фазных э. д. с. автотрансформатора.

Дополнительная обмотка 3 имеет магнитную связь с основными обмотками автотрансформатора 1 и 2. Она обычно выполняется на напряжении 6—10—35 кВ и используется для питания потребителей или подключения генераторов и СК. Автотрансформатор с дополнительной обмоткой аналогичен трехобмоточному трансформатору. При наличии третьей обмотки, в некоторых режимах (см. рис. 16-17, б) ток $I_{общ}$ равен не разности, а сумме $\dot{I}_1 + \dot{I}_2$. Для исключения перегрузки общей обмотки (выбираемой по $S_{расч}$), например, в режиме передачи мощности из обмотки 3 только на сторону среднего напряжения номинальная мощность третьей обмотки принимается равной $S_{расч}$ автотрансформатора.

16-2. ЗАЩИТА ОТ СВЕРХТОКОВ ПРИ ВНЕШНИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

а) Общие положения

Защита от внешних к. з. служит для отключения трансформатора при к. з. на сборных шинах или на отходящих от нее присоединениях (рис. 16-4), если защиты или выключатели этих элементов отказали в работе.

Одновременно защита от внешних к. з. используется и для защиты от повреждения в трансформаторе. Однако по условиям селективности защита от внешних к. з. должна иметь выдержку времени и, следовательно, не может быть быстродействующей. По этой причине в качестве основной защиты от повреждений в трансформаторах она используется лишь на маломощных трансформаторах. На трансформаторах, имеющих специальную защиту от внутренних повреждений, защита от внешних к. з. служит резервом к этой защите на случай ее отказа или вывода из работы.

Наиболее простой защитой от внешних к. з. является токовая максимальная защита. В тех случаях, когда ее чувствительность оказывается недостаточной, применяются более чувствительные токовые максимальные защиты с пуском (блокировкой) по напряжению или же токовые защиты обратной и нулевой последовательностей.

Понижительные трансформаторы, к которым относятся трансформаторы, питающие потребителей, в большинстве случаев защищаются с помощью максимальной защиты. При внешних к. з. по этим трансформаторам проходит ток к. з. от всех генераторов системы (рис. 16-4, а). Поэтому кратность тока к. з. получается обычно значительной и достаточной для действия максимальной защиты. При недостаточной чувствительности простой максимальной защиты устанавливаются более чувствительные защиты: максимальная защита с пуском по напряжению и защита обратной последовательности. Возможно применение дистанционных защит, реагирующих на $Z = f(\varphi_p)$.

Повышающие трансформаторы, устанавливаемые на электростанциях, находятся в худших условиях.

Применение на этих трансформаторах максимальной токовой защиты в большинстве случаев оказывается невозможным из-за недостаточной чувствительности последней при к. з. на стороне высшего напряжения.

В этом случае величина тока к. з. I_k , проходящего через защиту (рис. 16-4, б), определяется мощностью генераторов электростанции, которая соизмерима с мощностью повысительного трансформатора, и поэтому кратность тока к. з. получается небольшой, а чувствительность защиты — недостаточной.

В связи с этим для защиты повысительных трансформаторов от внешних к. з. применяются более чувствительные защиты: защита, реагирующая на ток обратной последовательности; токовая защита нулевой последовательности и максимальная защита с пуском по напряжению. В зарубежной практике применяются и дистанционные защиты.

б) Токовые максимальные защиты трансформаторов

Защита двухобмоточных понизительных трансформаторов. Схема подобной защиты трансформатора с односторонним питанием приведена на рис. 16-5. Защита устанавливается со стороны источника питания с тем, чтобы включить в ее действия сам трансформатор.

Для расширения зоны действия максимальной токовой защиты трансформаторы тока располагаются у выключателя.

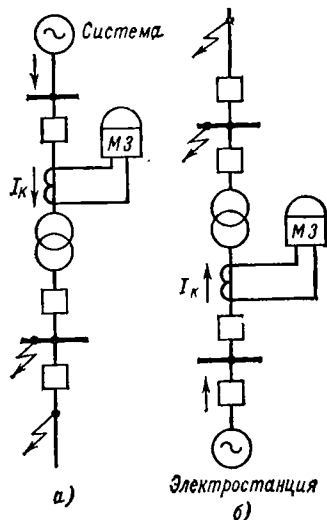


Рис. 16-4. Размещение защиты от сверхтока трансформатора.

На двухобмоточных трансформаторах с односторонним питанием (рис. 16-5) защита должна действовать на выключатель $B1$ со стороны источника питания. Однако по соображениям надежности целесообразно воздействовать на оба выключателя: $B1$ и $B2$, с тем чтобы при внешних к. з. один выключатель резервировался вторым.

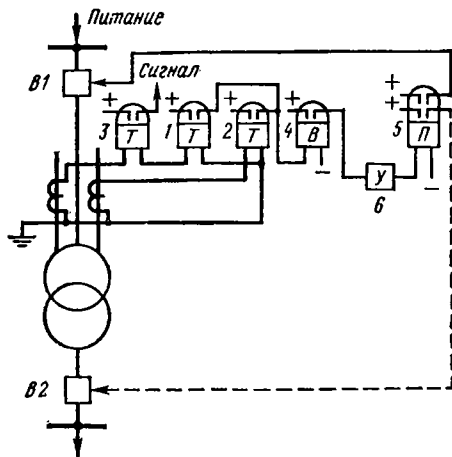


Рис. 16-5. Максимальная токовая защита двухобмоточного трансформатора.

Схема соединений трансформаторов тока и реле максимальной токовой защиты должна обеспечивать работу защиты при всех возможных видах к. з. В сети с глухозаземленной нейтралью защита выполняется по трехфазной схеме, а в сети с изолированной нейтралью — по схеме неполной звезды. *Схема с одним реле, включенным на разность токов двух фаз, на трансформаторах с соединением обмоток звезда — треугольник не рекомендуется к применению, так как защита в этом случае не действует при некоторых видах двухфазных к. з. на стороне треугольника (см. § 3-6, ж, рис. 3-17).*

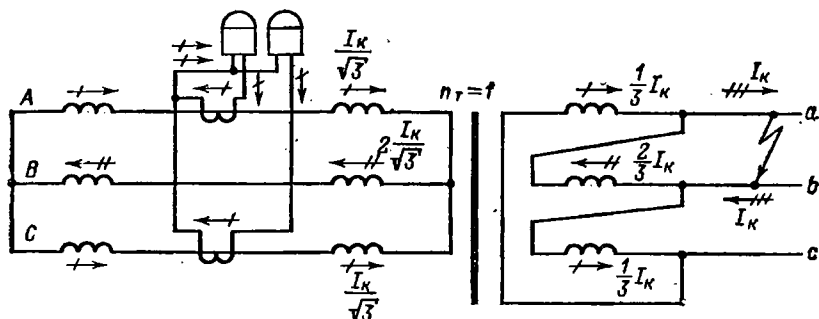


Рис. 16-6. Распределение токов в трансформаторе с соединением обмоток Δ/Δ при двухфазном к. з. на стороне треугольника.

Схема неполной звезды по сравнению с трехфазной имеет меньшую чувствительность при к. з. за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник. Так, например, если защита установлена на фазах A и C звезды (рис. 16-6), то при к. з. между фазами a и b на стороне треугольника (рис. 16-6) в реле защиты протекает лишь половина полного тока к. з. Для

повышения чувствительности защиты можно устанавливать третье реле в общем проводе трансформаторов тока, в котором (см. рис. 16-6) в этом случае проходит сумма токов поврежденных фаз:

$$I_{0.н} = I_A + I_C = 2 \frac{I_K}{\sqrt{3}}.$$

Выбор уставок. Ток срабатывания максимальной токовой защиты выбирается исходя из условия, что защита от к. з. не должна действовать при перегрузках, не требующих быстрого отключения трансформатора.

Максимальный ток нагрузки, от которого необходимо отстроить защиту, обычно определяется из рассмотрения двух режимов: отключение параллельно работающего трансформатора или автоматическое подключение нагрузки при действии АВР (рис. 16-7). Оставшийся в работе трансформатор перегружается в первом случае вдвое ($I_{наг. макс} = 2I_{ном. т}$), а во втором (рис. 16-7) ток перегрузки равен сумме тока I_1 трансформатора $T1$ и тока подключившейся нагрузки I_2 , т. е. $I_{раб} = I_1 + I_2$, где I_2 — установившийся ток подключившейся нагрузки. В первый момент после переключения нагрузки ее ток превышает установившееся значение за счет самозапуска оставшихся в работе двигателей. Оценивая это увеличение коэффициентом k_3 , характеризующим кратность токов самозапуска к току I_2 , получаем, что максимальный ток трансформатора при действии АВР равен: $I_{наг. макс} = I_1 + k_3 I_2$. Аналогичным образом определяется максимальный ток нагрузки и в других подобных случаях. В общем случае с учетом самозапуска двигателей при восстановлении напряжения после отключения к. з. в сети или после успешного действия АПВ максимальный расчетный ток нагрузки $I_{наг. макс} = k_3 I_{раб. макс}$, где $I_{раб. макс}$ — установившееся значение максимального тока нагрузки в условиях нормальной работы; k_3 — коэффициент самозапуска, учитывающий увеличение $I_{раб. макс}$ в результате самозапуска двигателей, оставшихся в работе при понижении или исчезновении напряжения во время к. з. или бестоковой паузы АПВ либо АВР.

Ток срабатывания находится из условия возврата реле при $I_{наг. макс}$, как и для всех максимальных защит (см. § 4-5), по выра-

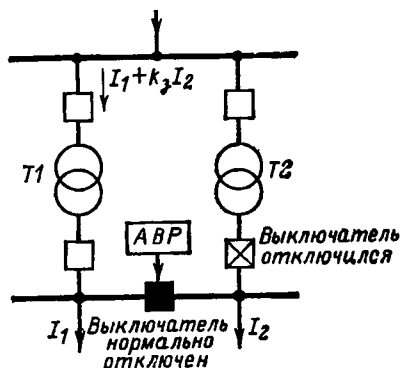


Рис. 16-7. При отключении трансформатора $T2$ и включении от АВР секционного выключателя возникает перегрузка трансформатора $T1$.

$$I_{с.з} = \frac{k_{ц}k_3}{k_{воз}} I_{раб. макс.} \quad (16-4)$$

Коэффициент чувствительности при к. з. в конце второго участка находится по формуле $k_3 = I_{н. мин}/I_{с.з.}$. Величина k_3 не должна быть меньше 1,3.

Если чувствительность максимальной защиты оказывается неудовлетворительной, то применяются другие более чувствительные защиты, рассмотренные ниже.

Выдержка времени выбирается из условий селективности на ступень выше наибольшей выдержки времени t_d защит присоединений, питающихся от трансформатора, т. е.

$$t_T = t_d + \Delta t. \quad (16-5)$$

Выдержка времени максимальной токовой защиты с ограничено зависимой характеристикой выбирается, исходя из условия (16-5) в предположении, что ток в реле равен току к. з., проходящему через трансформатор в случае повреждения в начале линии, питаемой трансформатором. Защиту с ограничено зависимой характеристикой следует применять в тех случаях, когда посредством ее удастся ускорить отключение повреждения в трансформаторе или на шинах.

Защита трехобмоточных понизительных трансформаторов. При внешних к. з. защита трехобмоточных трансформаторов (рис. 16-8) должна обеспечивать селективное отключение только той обмотки трансформатора, которая непосредственно питает место повреждения. Так, например, при коротком замыкании на шинах III (рис. 16-8) должен отключиться выключатель B_3 , а обмотки трансформатора I и II должны остаться в работе.

На трехобмоточных трансформаторах с односторонним питанием (например, от шин I) на обмотках II и III устанавливаются самостоятельные комплекты максимальной защиты, действующие на соответствующие выключатели (рис. 16-8). На обмотке I, питающей трансформатор, устанавливается третий комплект защиты, предназначенный для отключения трансформатора при к. з. в нем и резервирования защит и выключателей обмоток II и III. Выдержка времени t_1 выбирается больше t_2 и t_3 .

На трехобмоточных трансформаторах, имеющих двустороннее и трехстороннее питание, максимальная токовая защита не может обеспечить селективности. Так, например, если со стороны обмоток I и 2 (рис. 16-9) подключены источники питания, то при к. з. на шинах II время действия t_2 должно быть меньше t_1 , но тогда при к. з. на шинах I защита 2 окажется неселективной.

Для получения селективности защиту 2 необходимо выполнять направленной (рис. 16-9), так чтобы она действовала только при

к. з., на шинах II с $t_2 < t_1$. При к. з. на шинах I или III защита 2 должна работать помимо реле направления мощности (как максимальная токовая защита) с выдержкой $t_2 > t_1$ и t_3 (рис. 16-9).

Таким образом, на трансформаторах с двух- и трехсторонним питанием для обеспечения селективности необходимо применять направленные защиты.

Следует, однако, иметь в виду, что при наличии защиты шин и устройств резервирования отказа выключателей на присоединениях, питающихся от шин (см. гл. 20), вероятность работы максимальных защит трансформатора очень мала. Поэтому на практике

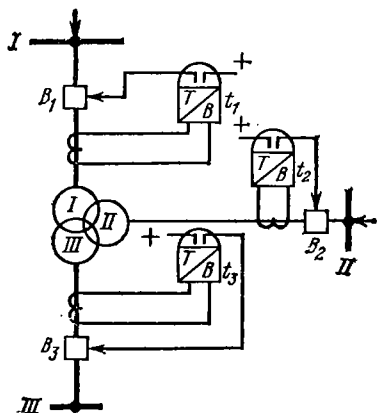


Рис. 16-8. Размещение максимальной токовой защиты на трехобмоточном трансформаторе.

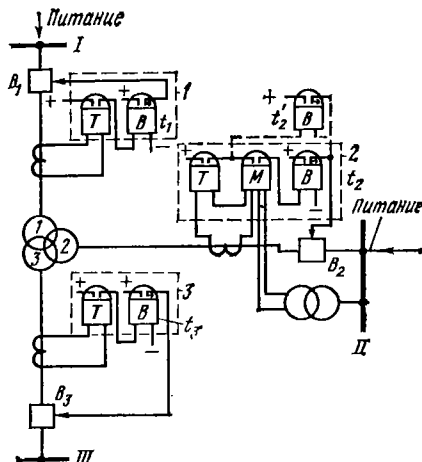


Рис. 16-9. Селективная защита от внешних к. з. на трехобмоточном трансформаторе с двусторонним питанием.

в целях упрощения защиты допускается применение простых токовых защит, особенно если на защищаемом трансформаторе имеются АПВ или АВР. Направленная защита устанавливается только на особо ответственных трансформаторах.

С целью упрощения защиты по «Правилам электротехнических установок» допускается не устанавливать защиты на одной из сторон трехобмоточного трансформатора, при этом выполняют защиту со стороны основного питания с двумя выдержками времени; с меньшей из них эта защита действует на отключение выключателя, не имеющего защиты от сверхтоков.

в) Токовая защита обратной последовательности

Защита реагирует на ток обратной последовательности, появляющийся при несимметричных к. з. внешних и в трансформаторе. Схема защиты показана на рис. 16-10. Защита состоит из

токового реле T_2 , включенного через фильтр обратной последовательности Φ_2 , и реле времени B , обеспечивающего необходимую выдержку времени.

Ток срабатывания защиты $I_{2с.з}$ выбирается в общем случае, исходя из двух условий [Л. 5]:

1) отстройки защиты от тока небаланса фильтра Φ_2 при максимальной нагрузке трансформатора:

$$I_{2с.з} > I_{нб, макс}; \quad (16-6)$$

2) согласования по чувствительности с защитами присоединений, отходящих от шин, на которые включен трансформатор:

$$I_{2с.з} > I_{2расч}, \quad (16-7)$$

где $I_{2расч}$ — ток I_2 , проходящий по трансформатору в условиях несимметричного к. з., при котором защита рассматриваемого присоединения находится на грани срабатывания.

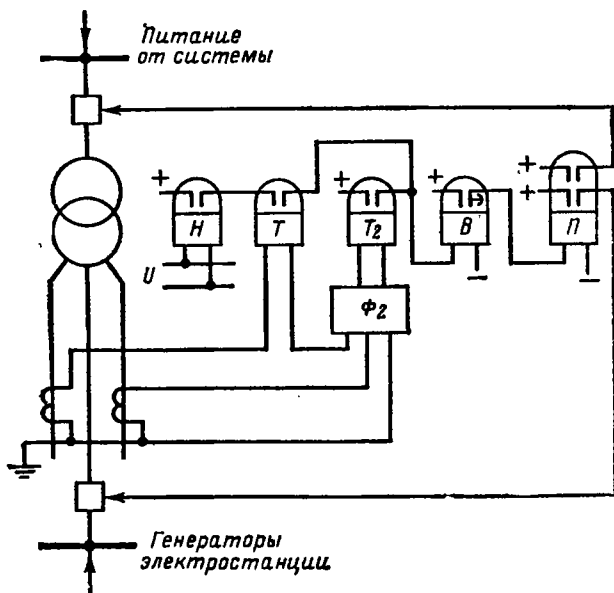


Рис. 16-10. Токовая защита обратной последовательности на повысительном трансформаторе.

Определение $I_{2расч}$ дано в [Л. 6]. Анализ показывает, что при $I_{с.з} = (0,5 \div 0,7) I_{ном}$ трансформатора условия (16-6) и (16-7) обычно выполняются.

Отсюда следует, что чувствительность защиты обратной последовательности при несимметричных к. з. получается значительно большей, чем у максимальной защиты, у которой $I_{с.з} > I_{ном}$.

На трехобмоточных повышающих трансформаторах, имеющих питание с двух или трех сторон, для обеспечения селективности при несимметричных внешних к. з. необходимо применять направленную защиту с органом направления мощности, реагирующим на мощность обратной последовательности.

Защита обратной последовательности реагирует только на двухфазные и однофазные к. з., поэтому она обычно дополняется приставкой от трехфазных к. з. Последняя выполняется, как и на генераторах (§ 15-5), в виде однофазной максимальной защиты с блокировкой по напряжению (реле T и H на рис. 16-10).

Защита I_2 может применяться и на понизительных трансформаторах.

г) Токовая защита нулевой последовательности

Защита реагирует на ток I_0 , появляющийся в трансформаторе при внешних к. з. (однофазных и двухфазных на землю) и к. з. в трансформаторе. Она применяется на повышающих трансформаторах.

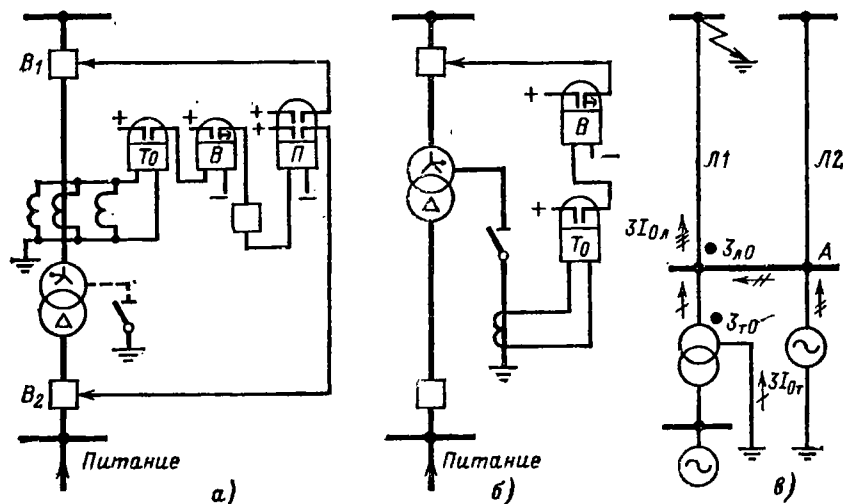


Рис. 16-11. Токовая защита нулевой последовательности повысительного трансформатора.

a — защита включается на трехтрансформаторный фильтр I_0 ; b — на ток в нейтрали трансформатора; v — схема сети с распределениями токов I_0 .

маторах и устанавливается со стороны обмотки высшего и среднего напряжения, если последние соединены по схеме звезды и работают с глухозаземленной нулевой точкой. Защита имеет два варианта исполнения, показанные на рис. 16-11, a и b . В обоих случаях защита состоит из токового реле T_0 , включенного на ток нулевой

последовательности I_0 . В схеме на рис. 16-11, а ток $3I_0$ получается от трехтрансформаторного фильтра нулевой последовательности, а в схеме рис. 16-11, б — от трансформатора тока, включенного в провод, связывающий нейтраль трансформатора с землей. Вторая схема проще и охватывает своей зоной действия обмотки звезды силового трансформатора. Благодаря указанным преимуществам она рекомендуется к применению.

Для обеспечения селективности защита выполняется с реле времени B .

Уставки защиты. Ток срабатывания защиты, включенной на ток в заземляющем проводе трансформатора (рис. 16-11, б), выбирают, исходя из двух условий:

1) Для соблюдения селективности защита трансформатора должна быть согласована по чувствительности с защитами нулевой последовательности линий, отходящих от шин электростанции А (рис. 16-11, в).

2) Защита должна надежно действовать при однофазных и двухфазных к. з. в конце наиболее длинной линии, отходящей от шин А.

По первому условию

$$I_{с.з.т} = k_n 3I_{0расч}, \quad (16-8)$$

где $I_{0расч}$ — ток нулевой последовательности в трансформаторе при однофазном и двухфазных к. з. на землю в условиях, когда защита, с которой производится согласование по чувствительности, находится на грани срабатывания, т. е. когда ток $3I_0$ в этой защите (например, в $3I_{0л}$ линии ЛЛ) равен ее току срабатывания: $3I_{0л} = I_{с.з.л}$. Как видно из рис. 16-11, в, на котором приведена в качестве примера схема сети, ток $3I_{0т}$ в нейтрали трансформатора составляет часть тока $3I_{0л}$, проходящего в линии. Это отношение характеризуется коэффициентом распределения $k_t = 3I_{0т}/3I_{0л}$. Отсюда $3I_{0т} = k_t \cdot 3I_{0л}$. Допустив, что $3I_{0л} = I_{с.з.л}$, найдем соответствующий ток в нейтрали трансформатора

$$3I_{0т} = 3I_{0расч} = k_t I_{с.з.л}. \quad (16-8а)$$

Сделав подстановку (16-8а) в (16-8), получим:

$$I_{с.з.т} = k_n k_t I_{с.з.л}. \quad (16-8б)$$

По второму условию $I_{с.з.т}$ должен быть меньше минимального значения тока $3I_{0т.мин}$, проходящего по нейтрали трансформатора при к. з. на землю в конце линии (в точке К на рис. 16-11, в). Согласно ПУЭ при к. з. в конце отходящих линий коэффициент чувствительности $k_{\eta} = \frac{3I_{0т.мин}}{I_{с.з.т}} \geq 1,2$.

Выдержка времени (на реле В) выбирается из условия селективности с защитами присоединений, отходящих от шин станции, со стороны которых установлена рассматриваемая защита $З_{т0}$.

На трехобмоточных трансформаторах (рис. 16-12), имеющих две обмотки (II и III) с заземленными нейтральными, защиты нулевой последовательности выполняются направленными, что необходимо для обеспечения селективности.

Защита на автотрансформаторах. На выполнение этой защиты влияют особенности автотрансформаторов, и она поэтому имеет некоторые отличия от трансформаторной защиты:

1. У автотрансформаторов заземляются концы обмоток среднего напряжения, являющиеся общей частью обмотки автотрансформатора. Как указывалось, по общей части обмотки

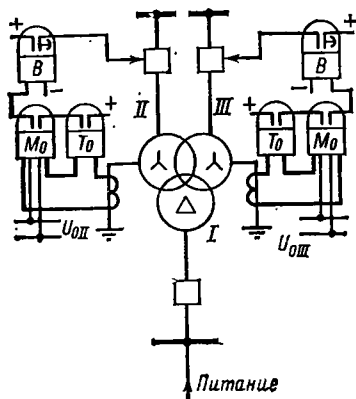


Рис. 16-12. Направленная защита нулевой последовательности трехобмоточного повысительного трансформатора.

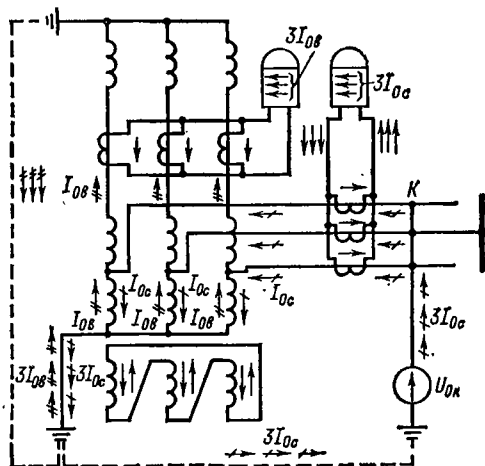


Рис. 16-13. Размещение защиты нулевой последовательности на автотрансформаторе.

протекают встречно направленные токи высшего и среднего напряжения (рис. 16-2, б).

При к. з. на землю (рис. 16-13) в сети одного напряжения (например, в точке К) в заземляющем проводе течет ток $3I_0 = 3I_{0c} - 3I_{0в}$. Этот ток получается меньше своих составляющих и может оказаться недостаточным для надежной работы защиты. Поэтому защита нулевой последовательности в заземляющем проводе автотрансформатора не устанавливается, ее включают на трехтрансформаторный фильтр I_0 , устанавливаемый со стороны выводов высшего и среднего напряжения. При таком исполнении она реагирует на полные токи $3I_0$ высшего и среднего напряжения, т. е. на $3I_{0в}$ и $3I_{0с}$ соответственно.

2. Вследствие наличия электрической связи между обмотками высшего и среднего напряжения автотрансформатора к. з. на землю на стороне одного напряжения вызывает токи I_0 на стороне другого.

В связи с этим возникает необходимость в согласовании выдержек времени защит нулевой последовательности на выводах высшего и среднего напряжения автотрансформатора. Для обеспечения селективности эти защиты выполняются направленными (рис. 16-14), так чтобы каждая из них действовала только при к. з. в сети своего напряжения.

3. Поскольку наличие автотрансформаторной связи между сетями высшего и среднего напряжения приводит к необходимости согласования выдержек времени защит, реагирующих на ток I_0 , в сетях одного напряжения с защитами сетей другого напряжения, это увеличивает число ступеней и вызывает повышение выдержек времени на защитах. Для их уменьшения защиты нулевой последовательности на автотрансформаторах рекомендуется выполнять двухступенчатыми и направленными (рис. 16-14).

Первая ступень осуществляется в виде отсечки с $t = 0,5$ с. Она отстраивается от быстродействующих защит присоединений, отходящих от шин. Вторая ступень выполняется как чувствительная защита, полностью резервирующая защиту следующего участка сети.

Ток срабатывания защиты должен отстраиваться от тока небаланса, возникающего в трехтрансформаторном фильтре

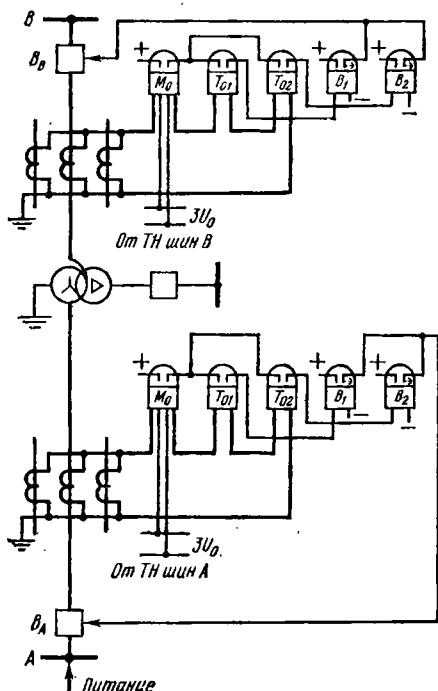
Рис. 16-14. Направленная защита нулевой последовательности автотрансформатора, имеющего двустороннее питание токами I_0 .

I_0 при междуфазных к. з., и согласовываться по чувствительности с защитами отходящих линий согласно (16-86).

Ток небаланса определяется так же, как и в аналогичной защите линий (см. гл. 8).

д) Защита от внешних к. з. на землю повышающих трансформаторов, работающих с разземленной нейтралью

Для ограничения токов к. з. часть повышающих трансформаторов работает с разземленной нейтралью. Для таких трансформаторов возникает опасность при выделении их на изоли-



рованную работу на сеть, имеющую замыкание на землю одной из фаз.

Подобные условия могут возникнуть, если, например, при однофазном к. з. на одной из линий (рис. 16-15, а) ее защита или выключатель откажут в действии. Тогда все присоединения, питающие место к. з. током I_0 , отключаются резервными защитами (точки отключения отмечены на чертеже крестиком), а трансформатор T_2 с незаземленной нейтралью останется работать на выделившийся участок сети с повреждением в точке К. Как известно, в такой сети при замыкании на землю возникают опасные перенапряжения, которые могут повредить изоляцию трансформатора.

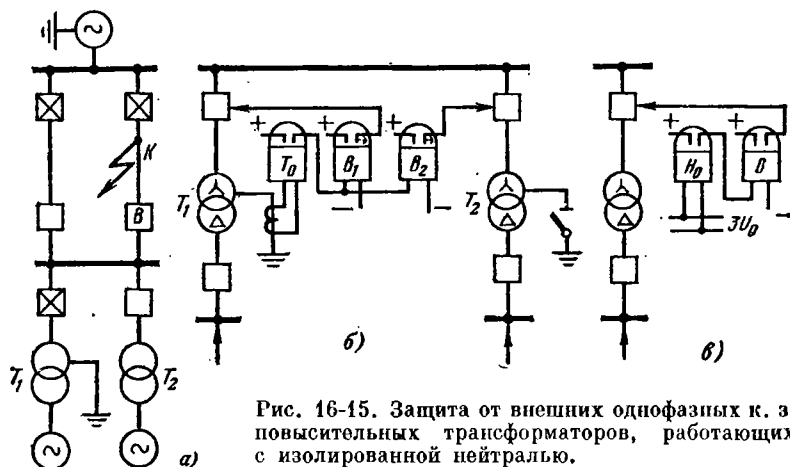


Рис. 16-15. Защита от внешних однофазных к. з. повысительных трансформаторов, работающих с изолированной нейтралью.

Для предупреждения этого трансформаторы, работающие с изолированной нейтралью, должны иметь резервную защиту, отключающую их при замыканиях на землю раньше, чем могут отключиться трансформаторы с заземленными нейтральями.

В качестве указанной защиты может применяться:

1) **токовая защита нулевой последовательности**, установленная на параллельно работающих трансформаторах с заземленной нейтралью.

Для этого на защите нулевой последовательности трансформатора T_1 с заземленной нейтралью предусматриваются две выдержки времени (рис. 16-15, б). С меньшей выдержкой защита отключает трансформатор T_2 с разземленной нейтралью, а с большей — трансформатор T_1 с заземленной нейтралью;

2) **защита, реагирующая на появление напряжения U_0** (рис. 16-15, в). Эта защита выполняется с помощью чувствительного реле повышения напряжения H_0 , которое включается на разомкнутый треугольник шинного трансформатора напряжения.

При к. з. на землю в сети защита H_0 приходит в действие и отключает трансформатор с разземленной нейтралью с выдержкой времени меньшей, чем на защитах I_0 трансформаторов с заземленной нейтралью.

Напряжение срабатывания реле H_0 отстраивается от $U_{нб}$ и согласуется по чувствительности с защитами отходящих линий;

3) **Защита обратной последовательности, реагирующая на ток I_2 , появляющийся при к. з. на землю.**

Полные схемы и другие варианты указанных выше защит приведены в [Л. 5].

е) Токовая защита с пуском по напряжению

Принцип действия и схема защиты аналогичны подобной же защите генераторов. Так же как и на генераторах (см. § 15-5, 6), эта защита может выполняться с пуском от трех реле минимального напряжения или с комбинированным пуском от реле H_2 и реле, реагирующего на понижение напряжения сети H . Последняя

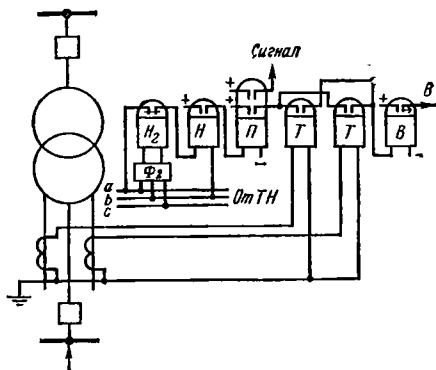


Рис. 16-16. Максимальная токовая защита двухобмоточного трансформатора с пуском от напряжения.

схема как более чувствительная рекомендуется к применению и показана на рис. 16-16. Защита с пуском по напряжению не действует при перегрузках, в связи с этим отпадает необходимость в отстройке токовых реле защиты T от аварийных нагрузок, что и позволяет получить большую, чем у простой максимальной защиты, чувствительность.

Для улучшения чувствительности пуска по напряжению цепи напряжения защиты обычно питаются от трансформатора напряжения,

установленного с той стороны трансформатора, где должна действовать рассматриваемая защита. Уставки защиты выбираются согласно формулам (15-21) — (15-22). Пуск по напряжению повышает чувствительность защит от междуфазных к. з., применяется как на повышающих, так и на понижающих трансформаторах.

16-3. ЗАЩИТА ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

а) Защита от перегрузки трансформаторов

На трансформаторах, находящихся под наблюдением персонала, защита от перегрузки выполняется действующей на сигнал посредством токового реле $З$,

показанного в схеме на рис. 16-5. Токовое реле 3 устанавливается в одной фазе, поскольку перегрузка трансформатора возникает одновременно во всех трех фазах. Чтобы избежать излишних сигналов при коротких замыканиях и кратковременных перегрузках, предусматривается реле времени, обмотки которого должны быть рассчитаны на длительное прохождение тока (на схеме на рис. 16-5 не показано).

Ток срабатывания выбирается из условия возврата токового реле при номинальном токе трансформатора:

$$I_{с.з} = \frac{k_n}{k_{воз}} I_{ном},$$

где $k_n = 1,05$.

Время действия перегрузочной защиты выбирается на ступень больше времени максимальной защиты трансформатора:

$$t_{перг} = t_{макс.з} + \Delta t.$$

На подстанциях без дежурного персонала защита от перегрузок выполняется трехступенчатой. Первая ступень работает при малых перегрузках и действует на сигнал, передаваемый с помощью телемеханики на дежурный пункт. Выдержка времени $t_1 = t_{макс.заш} + \Delta t$. Вторая ступень действует при больших перегрузках, когда требуется быстрая разгрузка. Эта ступень действует на отключение части потребителей, разгружая трансформатор до допустимого значения. Выдержка времени второй ступени $t_2 \leq t_{доп}$, где $t_{доп}$ — допустимое время перегрузки, определяемое перегрузочной характеристикой трансформатора. Вторую ступень желательно выполнять с зависимой от тока характеристикой, соответствующей перегрузочной характеристике трансформатора.

Третья ступень — страховочная, она действует на отключение трансформатора, если по каким-либо причинам вторая ступень не осуществит разгрузки. Выдержка времени $t_3 = (t_2 + \Delta t) < t_{доп}$.

На трехобмоточных трансформаторах перегрузочная защита должна устанавливаться таким образом, чтобы она, во-первых, реагировала на перегрузку любой из трех обмоток и, во-вторых, обеспечивала защиту при работе трансформатора в режиме, когда одна из обмоток отключена.

Руководствуясь этими соображениями, на трехобмоточных трансформаторах с одинаковой мощностью обмоток и односторонним питанием перегрузочную защиту устанавливают только на питающей обмотке. При неравной мощности обмоток или двусторонним и трехсторонним питанием трансформаторов защиту следует ставить на всех обмотках.

6) Защита от перегрузки автотрансформаторов

Защита от перегрузки автотрансформаторов выполняется на основе требований к защите трехобмоточных трансформаторов с учетом особенностей токораспределения в обмотках автотранс-

форматора и различия номинальных мощностей обмоток. *Защита от перегрузки должна реагировать на перегрузку последовательной (П), общей (О) и дополнительной (Д) обмоток автотрансформатора (рис. 16-17, а).*

Номинальный (допустимый) ток в последовательной обмотке (относящейся к высшему напряжению) определяется по проходной мощности $S_{\text{прох}}$, а для общей части обмотки и обмотки низшего напряжения (соединенной в треугольник) — по расчетной (или типовой) мощности $S_{\text{расч}}$ (см. рис. 16-2).

Для контроля за перегрузкой обмотки среднего напряжения (общей) перегрузочное реле должно устанавливаться в нулевых выводах автотрансформатора, по которым протекает ток $I_{\text{общ}}$. Перегрузка последовательной обмотки (высшего

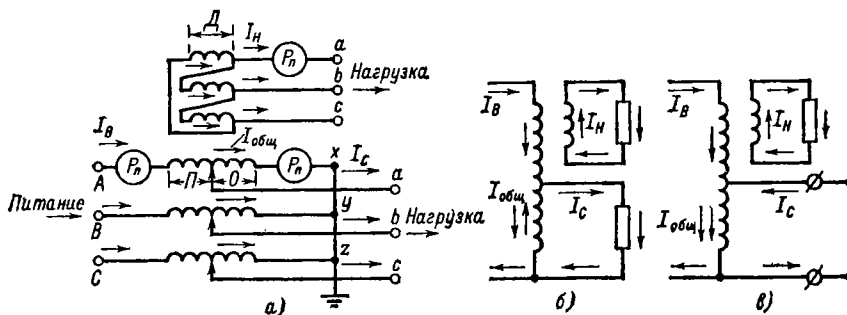


Рис. 16-17. Размещение защит и токораспределение в обмотках автотрансформатора при перегрузках.

а — в трехфазной схеме при одностороннем питании; б — токораспределение при одностороннем питании; в — при двустороннем питании.

напряжения) и обмотки низшего напряжения учитывается по току в выводах высшего и низшего напряжения соответственно. Места установки реле P_n отмечены на рис. 16-17, а кружком.

Необходимость установки защиты от перегрузки той или иной обмотки автотрансформатора определяется на основе анализа токораспределения при различных режимах его работы. Так, например, при перегрузке обмотки низшего напряжения в режиме, когда сторона среднего напряжения отключена, ток на стороне высшего напряжения может быть меньше номинального, так как мощность обмотки низшего напряжения равна $S_{\text{расч}}$ и меньше $S_{\text{прох}}$, по которой определяется $I_{\text{ном}}$ на стороне высшего напряжения. Отсюда следует, что на обмотке низшего напряжения *всех автотрансформаторов необходимо устанавливать защиту от перегрузки.*

Рассматривая токораспределение на понижающем автотрансформаторе, имеющем питание со стороны высшего напряжения (рис. 16-17, б), можно сделать вывод, что при перегрузке обмотки высшего напряжения токи в обмотках сред-

него и низшего напряжения могут быть ниже номинального. Следовательно, на автотрансформаторах, имеющих питание на стороне высшего напряжения, необходимо устанавливать защиту, реагирующую на перегрузку этой стороны. Указанная защита будет также защищать и общую обмотку автотрансформатора, так как перегрузка этой обмотки будет сопровождаться перегрузкой обмотки высшего напряжения.

При работе автотрансформаторов в режиме передачи энергии со стороны высшего и среднего напряжения на сторону низшего напряжения в общей обмотке проходит ток $I_{\text{общ}} = I_{\text{В}} + I_{\text{С}}$ (рис. 16-17, в).

В этих условиях общая обмотка может перегружаться при отсутствии перегрузки в двух других обмотках автотрансформатора.

На автотрансформаторах, работающих в указанном режиме, необходимо устанавливать защиту от перегрузки на нулевых выводах общей обмотки. Такая же защита должна предусматриваться на автотрансформаторах, в которых энергия передается со стороны среднего напряжения одновременно на высшее и низшее напряжение.

Более полный анализ перегрузки обмоток автотрансформатора приводится в [Л. 5, 6]. В соответствии с этим анализом на понижающих автотрансформаторах при питании со стороны высшего напряжения защита от перегрузки должна устанавливаться на сторонах высшего и низшего напряжения.

На тех же автотрансформаторах, имеющих питание и со стороны обмотки среднего напряжения, защита ставится и на нулевых выводах.

На повышающих автотрансформаторах защита устанавливается на всех трех обмотках.

16-4. ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА

Токковая отсечка является самой простой быстродействующей защитой от повреждений в трансформаторе, действующей с $t = 0$. Однако она не является полноценной, так как реагирует только на большие токи повреждения и охватывает своей зоной действия лишь часть трансформатора.

Отсечка не действует при витковых замыканиях и замыканиях на землю в обмотке, работающей на сеть с малым током замыкания на землю, и является по существу защитой от к. з. (междуфазных и однофазных).

Ток к. з. при повреждении на выводах трансформатора со стороны источника питания (в точке K_1 на рис. 16-18, а) обычно значительно больше, чем при повреждении за трансформатором (в точке K_2). Такое соотношение токов и дает возможность использовать для защиты трансформаторов токовую отсечку мгновенного действия (рис. 16-18, б).

Отсечка устанавливается с питающей стороны трансформатора и выполняется при помощи мгновенных токовых реле 1 или электромагнитного элемента реле РТ-90, если реле этого типа используются для выполнения максимальной защиты.

На трансформаторах, питающихся от сети с глухозаземленной нейтралью, отсечка устанавливается на трех фазах, а при питании от сети с изолированной нейтралью — на двух фазах.

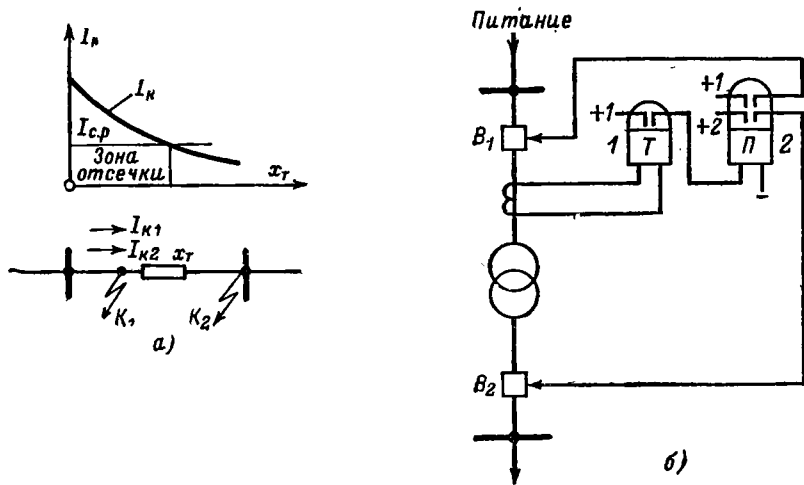


Рис. 16-18. Токвая отсечка.

а — принцип действия; б — однолинейная схема защиты.

Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока короткого замыкания при повреждении за трансформатором (в точке K_2) и вычисляется по формуле

$$I_{с.з} = k_n I_{к2\max}, \quad (16-9)$$

где k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,25—1,5 в зависимости от точности токовых реле (для реле типа РТ-90 и РТ-80 $k_n = 1,5$).

Кроме того, токовая отсечка должна отстраиваться от броска намагничивающего тока $I_{\text{нам}}$, возникающего при включении трансформатора под напряжение:

$$I_{с.з} > I_{\text{нам}}. \quad (16-10)$$

Для выполнения этого условия ток срабатывания должен в 3—5 раз превышать номинальный ток трансформатора.

В зону действия отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны, где установлена отсечка. В пределах этой зоны отсечка отключает повреждения без выдержки времени.

Поскольку отсечка является защитой от внутренних повреждений, она должна отключать трансформатор со всех сторон, имеющих источники питания.

Большим достоинством отсечки являются ее простота и быстрдействие. Ускоряя отключение повреждений на выводах трансформатора и в части его обмотки, токовая отсечка вместе с тем понижает выдержки времени на защитах присоединений, питающих шины, к которым подключен защищаемый трансформатор.

Отсечка в сочетании с максимальной защитой и газовой защитой (рассматриваемой ниже) обеспечивает хорошую защиту для трансформаторов малой мощности.

16-5. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА

а) Назначение и принцип действия дифференциальной защиты

Для защиты трансформаторов от к. з. между фазами, на землю и от замыканий витков одной фазы широкое распространение получила дифференциальная защита (рис. 16-19). Принцип действия дифференциальной защиты трансформаторов, так же как и дифференциальной защиты линий и генераторов, основан на сравнении величины и направления токов до и после защищаемого элемента (в данном случае трансформатора). При внешнем к. з. и нагрузке токи I_I и I_{II} с обоих концов трансформатора направлены в одну сторону, как показано на рис. 16-19, а, и находятся в определенном соотношении, равном коэффициенту трансформации трансформатора

$$\frac{I_{II}}{I_I} = N. \quad (16-10a)$$

При к. з. в трансформаторе токи I_I и I_{II} направлены встречно от шин к месту повреждения (рис. 16-19, б). В первом случае защита не должна действовать, во втором — должна работать. С учетом этого и выполняется схема защиты. Трансформаторы тока T_I и T_{II} , питающие схему, устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора. Их вторичные обмотки соединяются разноименными полярностями так, чтобы при внешнем к. з. и нагрузке вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ были направлены

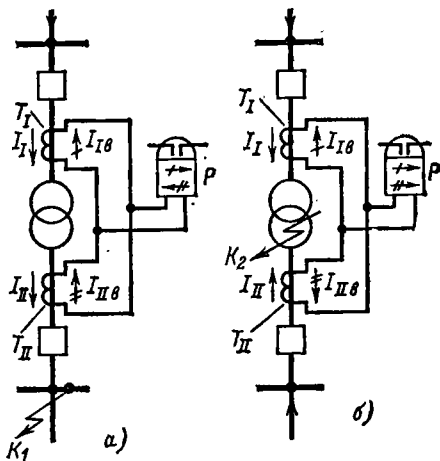


Рис. 16-19. Принцип действия дифференциальной защиты трансформатора. а — внешнее к. з.; б — к. з. в трансформаторе.

в контуре соединительных проводов последовательно (циркулировали по ним). Дифференциальное реле P включается параллельно вторичным обмоткам трансформаторов тока. При таком соединении в случае внешнего к. з. и при токе нагрузки и вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ замыкаются по обмотке реле P и направлены в ней встречно, поэтому ток в реле равен разности вторичных токов:

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{Iв} - \dot{I}_{IIв}. \quad (16-11)$$

При к. з. в защищаемом трансформаторе вторичные токи $I_{Iв}$ и $I_{IIв}$ проходят по обмотке реле в одном направлении, как это следует из рис. 16-19, б, в результате этого ток в реле равен их сумме:

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{Iв} + \dot{I}_{IIв}. \quad (16-11a)$$

Если $I_p > I_{с.р.}$, то реле сработает и отключит трансформатор.

Для того чтобы дифференциальная защита не работала при нагрузке и внешних к. з., необходимо уравновесить вторичные токи в плечах защиты так, чтобы ток в реле, равный их разности, отсутствовал:

$$\dot{I}_p = \dot{I}_{Iв} - \dot{I}_{IIв} = 0. \quad (16-11б)$$

Для этого необходимо, чтобы

$$\dot{I}_{Iв} = \dot{I}_{IIв}. \quad (16-12)$$

Выражения (16-11б) и (16-12) являются условием селективности при внешних к. з.

б) Особенности дифференциальной защиты трансформаторов и автотрансформаторов

В дифференциальной защите линий и генераторов первичные токи в начале и конце защищаемого участка одинаковы, поэтому для выполнения условия селективности (16-11б) достаточно иметь равенство коэффициентов трансформации трансформаторов тока. Иное положение имеет место в дифференциальной защите трансформаторов. *Первичные токи обмоток трансформатора не равны по величине и в общем случае не совпадают по фазе.*

В режиме нагрузки и внешнего к. з. ток трансформатора на стороне низшего напряжения I_{II} всегда больше тока на стороне высшего напряжения I_I . Их соотношение определяется коэффициентом трансформации силового трансформатора согласно (16-10а).

В трансформаторе с соединением обмоток звезда — треугольник и треугольник — звезда токи I_I и I_{II} различаются не только по величине, но и по фазе. Угол сдвига фаз зависит от группы соединения обмоток трансформатора. При наиболее распростра-

ненной, одиннадцатой группе линейный ток на стороне треугольника опережает линейный ток со стороны звезды на 30° (рис. 16-20, а). В трансформаторах с соединением обмоток звезда — звезда токи I_I и I_{II} или совпадают по фазе (рис. 16-20, б) или сдвинуты на 180° .

Таким образом, для выполнения условия селективности (16-116) необходимы специальные меры по выравниванию вторичных токов $I_{IV} = \dot{I}_I/n_{TI}$ и $I_{IIV} = \dot{I}_{II}/n_{TII}$ по величине, а при разных схемах соединения обмоток (λ/Δ и Δ/λ) — и по фазе, с тем чтобы поступающие в реле токи были равны.

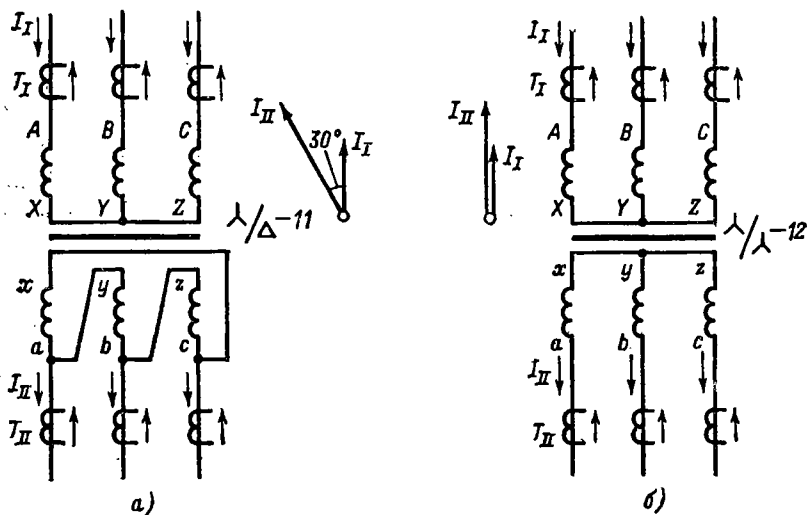


Рис. 16-20. Векторная диаграмма первичных и вторичных токов.

а — при соединении обмоток λ/λ ; б — при соединении обмоток λ/Δ .

Компенсация сдвига токов $\dot{I}_{IV}$ и $\dot{I}_{IIV}$ по фазе осуществляется соединением в треугольник вторичных обмоток трансформаторов тока, установленных на стороне звезды силового трансформатора (рис. 16-21). Соединение в треугольник обмоток трансформаторов тока должно точно соответствовать соединению в треугольник обмоток силового трансформатора.

Трансформаторы тока, расположенные на стороне треугольника силового трансформатора, соединяются в звезду.

На рис. 16-21 изображены векторные диаграммы токов в схеме защиты при нагрузке и внешних трехфазных к. з. Векторы первичных и вторичных токов в трансформаторах тока и силовом трансформаторе показаны на диаграмме совпадающими по фазе.

Из диаграммы следует, что токи в линейных проводах трансформаторов тока, соединенных в треугольник, $I_{AB(2)}$, $I_{BC(2)}$, $I_{CA(2)}$, сдвигаются относительно соответствующих фазных

токов во вторичной и первичной обмотках трансформаторов тока на угол 30° . Токи в проводах второй группы трансформаторов тока $I_{ab(2)}$, $I_{bc(2)}$ и $I_{ca(2)}$ совпадают по фазе со своими первичными токами и поэтому сдвинуты по отношению к первичному току звезды силового трансформатора, так же как и токи $I_{AB(2)}$, $I_{BC(2)}$, $I_{CA(2)}$, на угол 30° . В результате этого токи, поступающие в реле, совпадают по фазе.

Соединение одной из групп трансформаторов тока в треугольник обеспечивает компенсацию сдвига фаз между вторичными

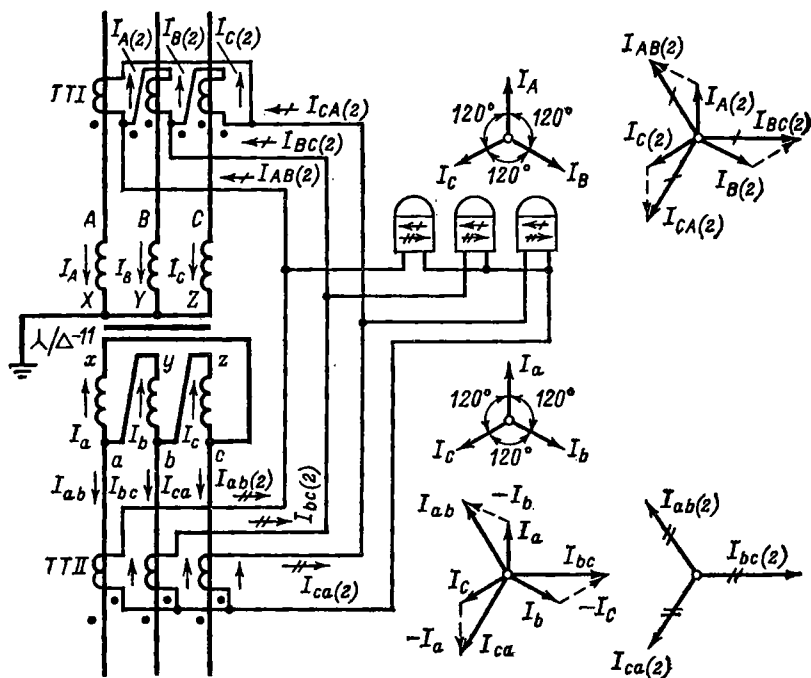


Рис. 16-21. Токораспределение и векторные диаграммы токов в схеме дифференциальной защиты.

и первичными токами силового трансформатора не только при симметричной нагрузке и трехфазных к. з., но и при любом несимметричном повреждении или нагрузочном режиме.

Справедливость этого положения наиболее просто доказывается с помощью метода симметричных составляющих. Токи прямой и обратной последовательностей симметричны, и поэтому токораспределение их в схеме защит полностью соответствует токораспределению при трехфазном к. з. (рис. 16-21). Следовательно, соединение одной из групп трансформаторов тока в треугольник, а другой — в звезду обеспечивает компенсацию сдвига фаз первичных токов прямой и обратной последовательностей.

Токи нулевой последовательности появляются в случае к. з. на землю и могут замыкаться только через обмотку трансформатора, соединенную в звезду, при условии, что ее нулевая точка заземлена. Проходя по этой обмотке, токи нулевой последовательности трансформируются в фазы обмотки, соединенные треугольником (рис. 16-22).

В контуре треугольника токи I_0 каждой фазы направлены последовательно и поэтому циркулируют в нем, не выходя за его пределы (рис. 16-22). Это означает, что в дифференциальной защите трансформаторов с соединением обмоток звезда — треугольник токи нулевой последовательности протекают только по трансформаторам тока, установленным со стороны звезды силового трансформатора.

Такое протекание первичных токов равноценно токораспределению при повреждении внутри трансформатора (при одностороннем питании) и может вызвать неправильную работу защиты. Эта опасность устраняется тем, что на стороне звезды силового трансформатора (где протекают первичные токи I_0) трансформаторы тока соединяются в треугольник, как показано на рис. 16-22. Тогда токи I_0 , трансформируясь на вторичную сторону трансформаторов тока, замыкаются в контуре этого треугольника, не попадая в реле. При соединении трансформаторов тока на стороне звезды силового трансформатора также в звезду токи нулевой последовательности получают возможность замыкаться через реле, что приведет к неправильной работе защиты при однофазных и двухфазных к. з. на землю в сети.

Таким образом, для компенсации сдвига фаз токов силовых трансформаторов, соединенных по схеме λ/Δ или Δ/λ , необходимо трансформаторы тока на стороне звезды соединить в треугольник, а на стороне треугольника — в звезду.

Выравнивание величин вторичных токов в плечах дифференциальной защиты достигается подбором коэффициентов трансформации n_{T1} , n_{TII} трансформаторов тока дифференциальной защиты и параметров специально для этой цели установленных промежуточных автотрансформаторов (рис. 16-23, а) или трансформаторов (рис. 16-23, б).

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока n_{T1} и n_{TII} выбираются с таким расчетом, чтобы вторичные токи

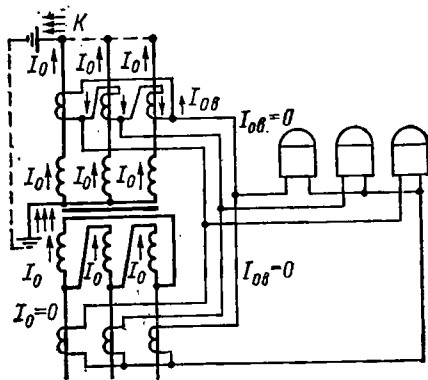


Рис. 16-22. Прохождение токов нулевой последовательности в схеме дифференциальной защиты.

в плечах защиты были равны, как это требуется по условию (16-12), при нагрузке и внешних к. з.

При соединении обмоток силового трансформатора Δ/Δ условие (16-12) имеет вид: $I_I/n_{TI} = I_{II}/n_{TII}$, откуда находим, что для обеспечения равенства токов в плечах защиты коэффициенты трансформации трансформаторов тока защиты должны удовлетворять условию

$$\frac{n_{TII}}{n_{TI}} = \frac{I_{II}}{I_I} = N, \quad (16-13)$$

где N — коэффициент трансформации силового трансформатора.

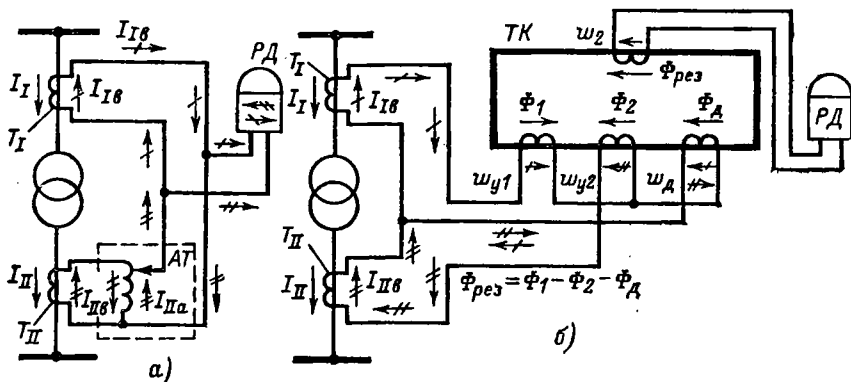


Рис. 16-23. Выравнивание вторичных токов в схеме дифференциальной защиты.

а — с помощью промежуточного автотрансформатора АТ; б — с помощью промежуточного трансформатора ТК.

При соединении обмоток по схеме Δ/Δ ток в плече, питающемся от трансформаторов тока, включенных в треугольник, равен $\frac{I_I}{n_{TI}} \sqrt{3}$, а в плече, питающемся от трансформаторов, соединенных в звезду, равен I_{II}/n_{TII} . С учетом этого уравнение (16-12) имеет вид:

$$\frac{I_I}{n_{TI}} \sqrt{3} = \frac{I_{II}}{n_{TII}},$$

отсюда

$$\frac{n_{TII}}{n_{TI}} = \frac{I_{II}}{I_I \sqrt{3}} = \frac{N}{\sqrt{3}}. \quad (16-14)$$

Задаваясь одним из коэффициентов трансформации, например n_{TII} , можно найти, пользуясь выражением (16-13) или (16-14), расчетное значение второго — n_{TI} , обеспечивающее равенство вторичных токов в плечах защиты. Найденный, таким образом, n_{TI} , как правило, получается нестандартным. Поэтому используются

стандартные трансформаторы с ближайшим к расчетному значению коэффициентом трансформации, а компенсация оставшегося неравенства осуществляется с помощью выравнивающих автотрансформаторов или трансформаторов. В первом случае (рис. 16-23, а) в одном из плеч защиты устанавливается автотрансформатор АТ. Для выравнивания токов в плечах защиты коэффициент трансформации n_a автотрансформатора подбирается так, чтобы его вторичный ток I_{IIa} был равен току I_{Ib} в противоположном плече защиты:

$$I_{IIa} = \frac{I_{Ib}}{n_a} = I_{Ib}.$$

Исходя из этого, находим:

$$n_a = \frac{I_{Ib}}{I_{IIa}} = \frac{I_{Ib}}{I_{Ib}}. \quad (16-15)$$

Во втором случае (рис. 16-23, б) применяется промежуточный компенсирующий трансформатор ТК. Трансформатор ТК состоит из трех первичных обмоток. Обмотки w_{y1} и w_{y2} (уравнительные) включаются в плечи защиты, а обмотка w_d (дифференциальная) — по дифференциальной схеме на разность токов $I_{Ib} - I_{IIb}$. Вторичная обмотка w_2 питает дифференциальное реле РД. Число витков уравнительных обмоток подбирается так, чтобы геометрическая сумма намагничивающих сил всех трех обмоток в условиях сквозного тока была равна нулю:

$$I_{Ib}w_{y1} - I_{IIb}w_{y2} + (I_{Ib} - I_{IIb})w_d = 0. \quad (16-16)$$

При выполнении этого условия результирующая н. с. и магнитный поток $\Phi_{рез}$ в магнитопроводе ТК отсутствуют, поэтому ток в дифференциальном реле $I_p = 0$.

В рассмотренной схеме неравенство токов плеч ($I_{Ip} \neq I_{IIb}$) компенсируется магнитным способом. Этот способ компенсации удобно сочетается с дифференциальным реле, включаемым через БНТ, и получил поэтому широкое распространение в Советском Союзе.

16-6. ТОКИ НЕБАЛАНСА В ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ

а) Составляющие тока небаланса

При внешних к. з. и нагрузке обеспечить полный баланс вторичных токов, поступающих в реле, не удастся. Вследствие неравенства вторичных токов в реле в указанных режимах появляется ток небаланса

$$I_{нб} = I_{Ib} - I_{IIb}, \quad (16-17)$$

который может вызвать неправильную работу защиты.

Неравенство вторичных токов обуславливается: погрешностью трансформаторов тока; изменением коэффициента трансформации силового трансформатора при регулировании напряжения; неполной компенсацией неравенства вторичных токов в плечах защиты; наличием намагничивающих токов силового трансформатора, вносящих искажение в его коэффициент трансформации.

Каждая из этих причин порождает свою составляющую $I_{нб}$. Рассмотрим эти составляющие и способы оценки их величины.

1) С о с т а в л я ю щ а я $I_{нб.т.т}$ вызывается наличием погрешностей (токов намагничивания) трансформаторов тока, питающих защиту (рис. 16-19). С учетом токов намагничивания разность вторичных токов, проходящих в реле при внешнем к. з.,

$$I_p = \dot{I}_{Iв} - \dot{I}_{IIв} = \left(\frac{\dot{I}_I}{n_I} - \dot{I}_{Iнам} \right) - \left(\frac{\dot{I}_{II}}{n_{II}} - \dot{I}_{IIнам} \right). \quad (16-17a)$$

Считая, что неравенство первичных токов по величине и фазе полностью скомпенсировано, получим, что $I_I/n_I = I_{II}/n_{II}$. С учетом этого из (16-17a) следует, что в реле появляется ток:

$$I_{нб.т.т} = \dot{I}_{IIнам} - \dot{I}_{Iнам}. \quad (16-17б)$$

Выражение (16-17б) показывает, что, как и в дифференциальных защитах линий и генераторов, ток небаланса, обусловленный погрешностью трансформаторов тока, равен геометрической разности намагничивающих токов трансформаторов тока защиты. Эта составляющая тока небаланса имеет наибольшую величину и является основной.

2) С о с т а в л я ю щ а я $I_{нб.рег}$ появляется при изменении (регулировании) коэффициента трансформации N силового трансформатора или автотрансформатора:

Компенсация неравенства первичных токов, осуществляемая с помощью компенсирующего трансформатора или вспомогательного автотрансформатора, обеспечивается при определенных соотношениях токов обмоток силовых трансформаторов, определяемых их коэффициентом трансформации N . При изменении N компенсация токов нарушается и в дифференциальном реле появляется ток небаланса $I_{нб.рег}$. Обычно параметры компенсирующих устройств (ω_y или n_a) подбираются для среднего значения N . При отклонении от него на $\pm \Delta N \%$ появляется ток небаланса

$$I_{нб.рег} = \frac{\Delta N \%}{100} I_{скв}, \quad (16-18)$$

где $I_{скв}$ — сквозной ток к. з., протекающий через трансформатор.

Обычно на силовых трансформаторах и автотрансформаторах предусматриваются ответвления, позволяющие изменять N в пределах $\pm 5\%$ номинального (среднего) значения. У трансформаторов с регулировкой N под нагрузкой $\Delta N = \pm 10 \div 15\%$.

3) Составляющая небаланса, возникающая при неточной компенсации неравенства токов плеч $I_{\text{нб.комп}}$, появляется в тех случаях, когда регулирующие возможности компенсирующих устройств не позволяют подобрать расчетные значения (ω или n_a), необходимые для полной компенсации.

4) Составляющая, обусловленная наличием тока намагничивания $I_{\text{нам}}$ у силового трансформатора. Ток намагничивания нарушает расчетное соотношение между первичным и вторичным токами силового трансформатора, что вытекает из схемы на рис. 16-23, и вызывает ток $I_{\text{нб.нам}} = I_{\text{нам}}$ трансформатора.

В нормальном режиме $I_{\text{нам}}$ силового трансформатора не превышает 1—5% номинального тока; при к. з. ток намагничивания уменьшается; при неустановившемся режиме, связанном с внезапным увеличением напряжения на трансформаторе, ток намагничивания силового трансформатора резко возрастает. В режиме нагрузки и к. з. $I_{\text{нб.нам}}$ обычно не учитывается из-за малой величины его.

5) Компенсирующие трансформаторы и автотрансформаторы вносят погрешность при трансформации токов плеч, что вызывает появление небаланса. Однако этот небаланс очень мал и поэтому не учитывается.

Из сказанного вытекает, что полный ток небаланса в дифференциальной защите трансформаторов при внешних к. з. определяется в основном $I_{\text{нб.т.т}}$ и $I_{\text{нб.рег}}$.

В некоторых случаях к ним добавляется ток $I_{\text{нб.комп}}$, вызванный неточностью компенсации неравенства токов в плечах защиты. Таким образом, в общем случае полный ток небаланса

$$I_{\text{нб}} = I_{\text{нб.т.т}} + I_{\text{нб.рег}} + I_{\text{нб.комп}}. \quad (16-19)$$

6) Причины повышенного $I_{\text{нб}}$ в дифференциальной защите трансформаторов и автотрансформаторов

Величина тока небаланса в дифференциальных защитах трансформаторов оказывается обычно большей, чем в дифференциальных защитах генераторов, что объясняется наличием дополнительных составляющих в токе небаланса ($I_{\text{нб.рег}}$ и $I_{\text{нб.комп}}$) и большим абсолютным значением составляющей $I_{\text{нб.т.т}}$, обусловленной погрешностями трансформаторов тока. Последнее вызывается тремя особенностями, характерными для дифференциальных защит трансформаторов.

Первая из них состоит в конструктивной разнотипности трансформаторов тока, применяемых на стороне высшего, среднего и низшего напряжения силовых трансформаторов.

Эти конструктивные различия порождают различие магнитных характеристик трансформаторов тока и их токов намагничивания, что приводит к увеличению разности $I_{\text{IIнам}} - I_{\text{Iнам}}$, определяющей величину $I_{\text{нб.т.т}}$.

Особенно резко отличаются характеристики трансформаторов тока, встраиваемых в вводы масляных выключателей (напряжением 35 кВ и выше), от характеристик выносных трансформаторов тока, применяемых на напряжения 10 и 6 кВ.

Второй особенностью дифференциальной защиты трансформаторов является большое сопротивление нагрузки, присоединенной ко вторичным обмоткам трансформаторов тока,

и значительное различие сопротивлений плеч.

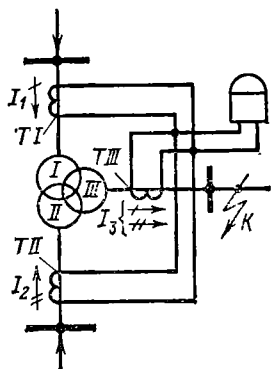


Рис. 16-24. Условия работы дифференциальной защиты трехобмоточного трансформатора при внешнем к. з.

Сопротивление нагрузки состоит из сопротивлений соединительных проводов между трансформатором тока и реле и определяется расстоянием от щита управления, где устанавливаются реле, до распределительных устройств, в которых размещаются трансформаторы тока защиты силовых трансформаторов. Очень часто эти расстояния бывают значительными и неодинаковыми по величине.

Кроме того, нужно учитывать, что сопротивление линейных проводов ложится утроенной нагрузкой на трансформаторы тока, соединенные в треугольник, благодаря чему даже при равенстве длин плеч трансформаторы тока, соединенные в треугольник, оказываются более загруженными, чем вторая группа трансформаторов тока, соединяемая в звезду (см. § 3-7).

Третья особенность имеет место у трехобмоточных трансформаторов, а также у двухобмоточных с двумя выключателями на стороне какой-либо обмотки.

В этих случаях кратности токов при внешних к. з. для различных групп трансформаторов тока дифференциальной защиты получаются неодинаковыми. Через одну группу (*TIII*) протекает суммарный ток к. з., в то время как через две группы (*TI* и *TII*) — лишь часть этого тока (рис. 16-24).

В результате первая группа трансформаторов тока *TIII* намагничивается сильнее, что вызывает резкое увеличение их намагничивающих токов по сравнению с намагничивающими токами двух остальных групп.

в) Расчет $I_{нб}$

Расчетным путем ток небаланса $I_{нб.т.т}$ оценивается, так же как и в дифференциальной защите генераторов, по приближенной формуле, из предположения, что при максимальном значении тока внешнего к. з. $I_{к.макс}$ погрешность трансформаторов тока ϵ не пре-

вышает 10% (0,1). В соответствии с этим

$$I_{\text{нб.т.т}} = k_{\text{одн}} 0,1 I_{\text{к.макс}}, \quad (16-20)$$

где $k_{\text{одн}}$ учитывает различие в погрешности трансформаторов тока, образующих дифференциальную схему, $k_{\text{одн}} = 0,5 \div 1$; при существенном различии условий работы и конструкций трансформаторов тока различие их погрешностей достигает максимального значения и тогда $k_{\text{одн}}$ принимается равным 1.

С учетом выражений (16-18) и (16-20) расчетное значение полного тока небаланса по выражению (16-19) примет вид:

$$I_{\text{нб}} = (k_{\text{одн}} 0,1 + \Delta N_{\text{пер}}) I_{\text{к.макс}}. \quad (16-20a)$$

г) Меры для предупреждения действия защиты от токов небаланса

Предотвращение работы защиты от токов небаланса достигается выбором тока срабатывания защиты $I_{\text{ср}} > I_{\text{нб}}$.

Очевидно, что данное условие ограничивает чувствительность защиты.

Для обеспечения достаточной чувствительности защиты принимаются меры к понижению величины $I_{\text{нб}}$. Уменьшение токов небаланса, обусловленных погрешностью трансформаторов тока $I_{\text{нб.т.т}}$, обеспечивается подбором трансформаторов тока и их вторичной нагрузки таким образом, чтобы они не насыщались при максимальном значении тока сквозного к. з. Для обеспечения этого условия трансформаторы тока и их вторичная нагрузка выбираются по кривым предельной кратности или по характеристикам намагничивания трансформаторов тока так, чтобы погрешность трансформаторов тока не превышала 10%.

Хотя указанные меры и позволяют уменьшить ток небаланса (за счет снижения $I_{\text{нб.т.т}}$), его значение остается все же большим. В связи с этим для повышения чувствительности дифференциальной защиты и вместе с тем для более надежной отстройки от токов небаланса применяются реле, включенные через быстронасыщающиеся вспомогательные трансформаторы, и реле с торможением.

16-7. ТОКИ НАМАГНИЧИВАНИЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И АВТОТРАНСФОРМАТОРОВ ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ ПОД НАПРЯЖЕНИЕ

а) Характер изменения токов намагничивания

При включении силовых трансформаторов под напряжение или при восстановлении на них напряжения после отключения внешнего к. з. в обмотке, питающей трансформатор, возникает резкий бросок тока намагничивания, имеющий затухающий характер (рис. 16-25). Максимальное значение этого тока в несколько раз превосходит номинальный ток трансформатора.

Резкое возрастание тока намагничивания объясняется насыщением магнитопровода трансформатора. При включении трансформатора под напряжение оно появляется на его обмотке внезапно. Аналогичная картина имеет место на трансформаторе после отключения к. з. при восстановлении напряжения (рис. 16-26).



Рис. 16-25. Характер изменения намагничивающего тока по времени.

Во время к. з. напряжение на трансформаторе понижается в пределе до нуля (точка А на рис. 16-26, а).

После отключения повреждения (точка В) происходит скачкообразное восстановление напряжения на зажимах трансформатора.

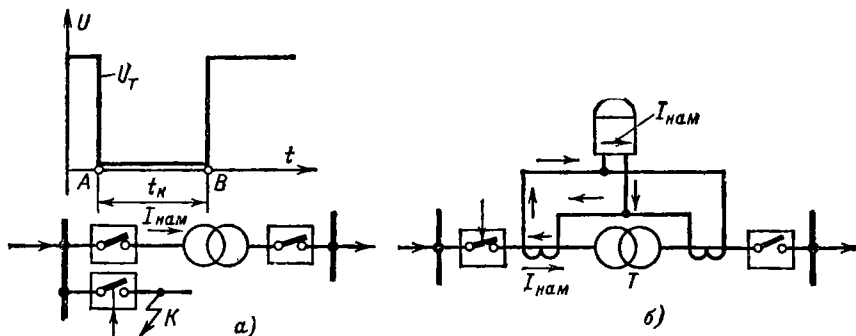


Рис. 16-26. Условия, при которых появляется бросок намагничивающего тока в трансформаторах.

В обоих случаях магнитный поток в сердечнике трансформатора устанавливается не сразу. Возникает переходный процесс, сопровождающийся появлением двух потоков: установившегося Φ_y и свободного, постепенно затухающего $\Phi_{св}$ (рис. 16-27). Результирующий поток $\Phi_T = \Phi_y + \Phi_{св}$; в начальный момент ($t = 0$) $\Phi_{T0} = 0$ и поэтому $\Phi_{св0} = -\Phi_{y0}$. Во втором полупериоде знаки обоих потоков совпадают и результирующий поток трансформатора достигает максимума $\Phi_{T.макс}$.

Установившийся поток Φ_y отстает от напряжения U_T на 90° , поэтому величина свободного потока $\Phi_{св0}$, а следовательно, и $\Phi_{T.макс}$ зависят от фазы U_T и достигают наибольшего значения при включении трансформатора в момент прохождения U_T через нуль. В этом случае без учета затухания $\Phi_{T.макс} \approx 2\Phi_y$. Величина потока $\Phi_{T.макс}$ может достигать и больших значений, если магнитопровод трансформатора имеет остаточное намагничивание и соответствующий ему поток $\Phi_{ост}$ совпадает по знаку со свободным потоком $\Phi_{св}$. Тогда $\Phi_{T.макс} = (2\Phi_y + \Phi_{ост}) > 2\Phi_y$.

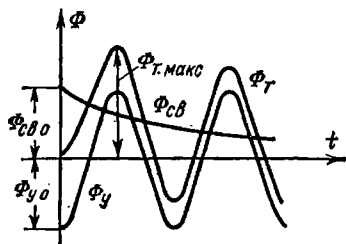


Рис. 16-27. Магнитные потоки в сердечнике трансформатора при включении его под напряжение.

При потоках, близких к $2\Phi_y$, магнитопровод трансформатора насыщается, что и обуславливает резкий рост (бросок) намагничивающего тока $I_{\text{нам}}$ трансформатора.

Изменение тока $I_{\text{нам}}$ по времени характеризуется следующими особенностями:

1. Кривая тока носит асимметричный характер до тех пор, пока $I_{\text{нам}}$ не достигнет установившегося значения.

2. Кривая может быть разложена на аperiodическую составляющую и синусоидальные токи различных гармоник. Аperiodическая составляющая имеет весьма большое удельное значение в токе $I_{\text{нам}}$.

3. Время затухания токов определяется постоянными времени трансформатора и сети и может достигать 2—3 с. Чем мощнее трансформатор, тем дольше продолжается затухание.

4. Первоначальный бросок тока может достигать 5—10-кратного значения номинального тока трансформатора. Кратность броска тока на мощных трансформаторах меньше, чем на мало-мощных.

Ток намагничивания $I_{\text{нам}}$ появляется только в одной обмотке силового трансформатора, той, на которую подается напряжение при его включении. Как видно из рис. 16-26, б, этот ток трансформируется через трансформатор тока защиты и поступает в реле, вызывая его работу, если $I_{\text{нам}} > I_{\text{с.з.}}$. Для предотвращения ложной работы дифференциальной защиты под действием $I_{\text{нам}}$ принимаются специальные меры, рассмотренные ниже.

б) Способы предотвращения работы защиты от бросков тока намагничивания

Наиболее простым и ранее широко применявшимся является способ замедления защиты на время порядка 1 с. Однако при этом терялось наиболее ценное свойство защиты — ее быстрдействие. Применялись и другие, более сложные способы отстройки от токов намагничивания с сохранением быстрдействия (блокировки от понижения напряжения, торможение от токов высших гармоник и т. д.).

Опыт эксплуатации показал, что эти способы или себя не оправдали, или приводили к усложнению защиты и не давали достаточно надежной отстройки от намагничивающих токов. Поэтому в Советском Союзе указанные способы не рекомендуются к применению.

На основании работ ВНИИЭ, ТЭП и опыта эксплуатации энергосистем в настоящее время в СССР приняты два способа отстройки от токов намагничивания.

Первый из них заключается в применении быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ), через которые включаются дифференциальные реле [Л. 66, 67]. БНТ не пропускают аperiodического тока, составляющего значительную часть тока намагничи-

вания, и позволяют, таким образом, надежно отстроить дифференциальные реле от намагничивающих токов.

Второй способ состоит в отстройке тока сбрасывания реле от тока намагничивания по величине. На таком принципе выполняется защита, называемая дифференциальной отсечкой.

Преимуществом обоих способов являются: простота, надежность и сохранение основного достоинства дифференциальной защиты — быстроты действия.

16-8. СХЕМЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

а) Варианты схем токовых цепей защиты

Схемы токовых цепей защиты на трансформаторах с соединением Δ/Δ могут выполняться в двух вариантах: по полной трехфазной схеме, показанной на рис. 16-21 с тремя реле, и упрощенной схеме в двухфазном исполнении на стороне треугольника силового трансформатора (рис. 16-28, а) с двумя реле А и С.

Упрощенная схема позволяет сэкономить один трансформатор тока. В этой схеме вместо

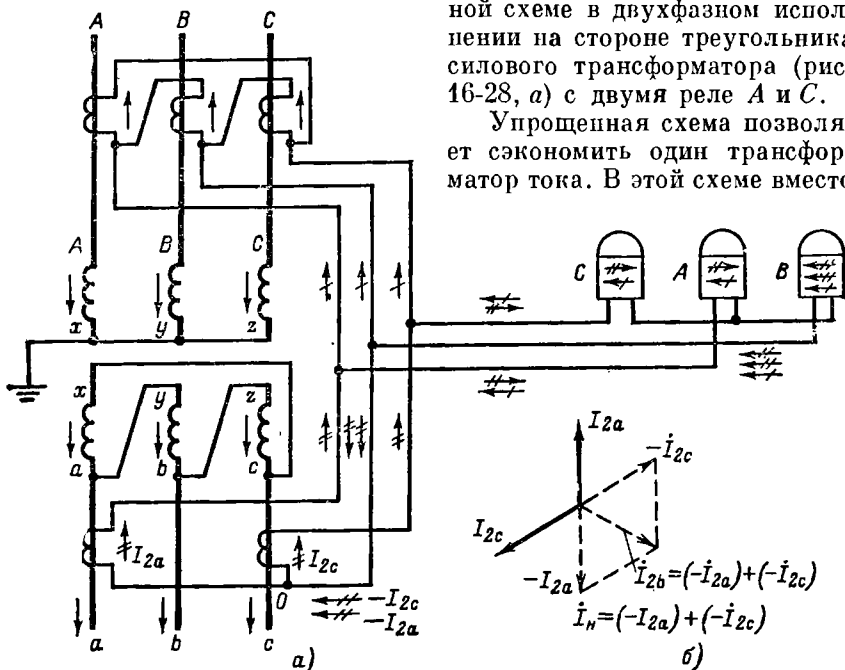


Рис. 16-28. Упрощенная схема дифференциальной защиты.

а — схема; б — векторная диаграмма.

провода отсутствующей фазы В используется нулевой (обратный) провод, в котором, как это следует из токораспределения на рис. 16-28, а, проходит геометрическая сумма противоположно направленных токов фаз А и С, т. е. ток, совпадающий по величине и направлению с током отсутствующей фазы В

(рис. 16-28, б):

$$\dot{I}_{обр} = (-\dot{I}_a) + (-\dot{I}_c) = \dot{I}_b.$$

Поэтому при всех случаях внешних к. з. токи в реле упрощенной схемы балансируются так же, как и в полной трехфазной схеме. В этом можно убедиться, построив распределение токов в цепях защиты при всех видах внешних к. з. или, что проще, рассмотрев для этих повреждений распределение токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

Упрощенная схема не действует при двойных замыканиях на землю на стороне низшего напряжения в тех случаях, когда земля в трансформаторе возникает на фазе, не имеющей трансформатора тока. Это повреждение будет отключаться другими защитами трансформатора — максимальной или газовой или защитой поврежденной линии.

На практике иногда применялась схема с третьим реле в фазе *В*. Такая схема обладает существенным недостатком — повышенным током небаланса в реле фазы *В*, поэтому она не рекомендуется к применению. В реле фазы (*В*) балансируются не два тока, как обычно, а три: $\dot{I}_{b\Delta}$ со стороны треугольника и токи двух трансформаторов тока *a* и *b* со стороны неполной звезды. В результате этого $\dot{I}_{нб}$ равен геометрической разности трех намагничивающих токов

$$(\dot{I}_{нам a} + \dot{I}_{нам c}) - \dot{I}_{нам b\Delta}$$

вместо двух в трехфазной схеме ($\dot{I}_{нам b\Delta} - \dot{I}_{нам b\Delta}$).

На трансформаторах большой и средней мощности следует применять трехфазную схему как более совершенную.

б) Дифференциальная токовая отсечка

Дифференциальная токовая отсечка выполняется посредством простых токовых реле, действующих на отключение без выдержки времени. Схема защиты показана на рис. 16-29.

Основным условием правильной работы защиты является отстройка тока срабатывания реле защиты от бросков намагничивающих токов, возникающих при включении трансформатора, и токов небаланса при внешних к. з.

Для облегчения отстройки от мгновенного пика бросков намагничивающих токов на выходе защиты следует устанавливать промежуточное реле с временем действия 0,04—0,06 с. За это время величина намагничивающего тока успевает снизиться, что позволяет не отстраиваться от максимального броска намагничивающего тока.

Ток срабатывания для отстройки от токов намагничивания при наличии выходного промежуточного реле со временем действия 0,03—0,06 с принимается в пределах $I_{с.з} = (3 \div 5) I_{ном.т.}$ Вы-

бранный ток срабатывания должен проверяться непосредственным включением холостого трансформатора под напряжение.

Трансформаторы тока должны выбираться по кривым предельной кратности так, чтобы их полная погрешность не превышала 10%. При этих условиях отстройка от тока намагничивания одновременно

обеспечивает отстройку и от токов небаланса при внешних к. з.

Из-за большой величины тока срабатывания защита недостаточно чувствительна к витковым замыканиям. Надежность действия защиты при повреждениях на выводах трансформатора с приемной стороны необходимо проверять по току к. з. Как обычно, чувствительность оценивается коэффициентом

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{к. макс}}}{I_{\text{с. з}}} \geq 1,5.$$

Рис. 16-29. Дифференциальная отсечка в двухфазном исполнении.

матров производится по § 16-5, 6. Для выравнивания токов используются автотрансформаторы ВУ-25Б.

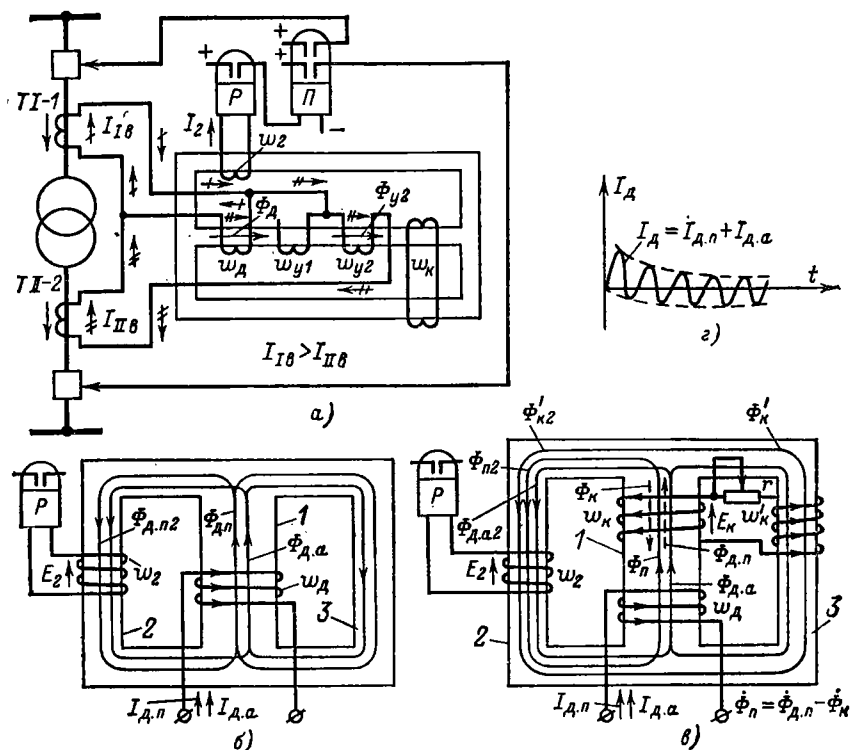
Достоинством защиты являются простота и быстродействие. Недостатком следует считать ограниченную чувствительность.

Дифференциальная отсечка обычно применяется на трансформаторах малой мощности в случаях, когда необходимо обеспечить быстрое и двустороннее селективное отключение их при междуфазных коротких замыканиях.

в) Дифференциальная защита с токовыми реле, включенными через быстронасыщающиеся трансформаторы

Схема и принцип действия. Применение быстронасыщающихся трансформаторов (БНТ) позволяет выполнить простую и быстродействующую дифференциальную защиту, надежно отстроенную от токов небаланса и бросков намагничивания. На рис. 16-30, а представлена схема дифференциальной защиты с реле типа РНТ-565. Как указывалось, БНТ плохо трансформирует аperiodические токи (см. гл. 15). Переходные токи небаланса и броски намагничивающих токов силовых трансформаторов расположены асимметрично относительно оси времени и содержат вследствие этого значительную аperiodическую составляющую,

которая не трансформируется на вторичную сторону БНТ, а почти полностью идет на намагничивание его сердечника. В реле защиты попадает лишь переменная составляющая тока небаланса и броска намагничивающего тока силового трансформатора. Однако за счет насыщения сердечника БНТ, обусловленного подмагничивающим действием апериодического тока, трансформация переменной со-



ность такого замедления невелика и составляет 0,03—0,1 с. Замедление действия является недостатком схемы с БНТ.

На рис. 16-31, а приведена полученная из опытов осциллограмма тока намагничивания силового трансформатора $I_{\text{нам}}$, протекающего по первичной обмотке БНТ, и соответствующего ему тока I_p во вторичной обмотке БНТ, а на рис. 16-31, б — осциллограмма тока к. з. I_k и вызванного им тока небаланса $I_{\text{нб}}$ и тока I'_p , протекающих по первичной и вторичной обмоткам БНТ. Эти осциллограммы наглядно показывают резкое снижение тока в реле и эффективность насыщающегося трансформатора.

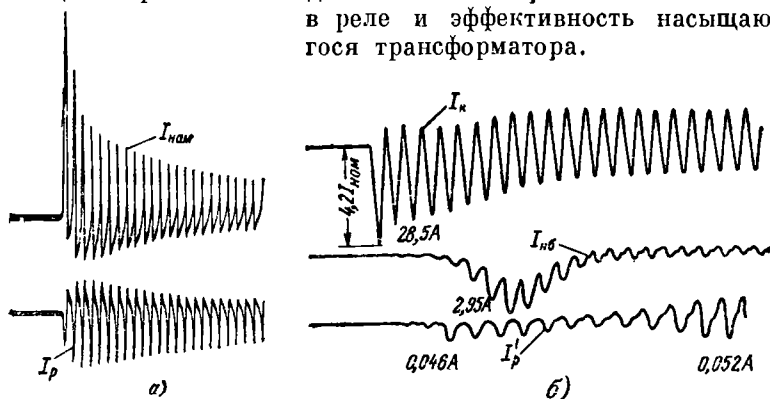


Рис. 16-31. Осциллограммы токов в обмотках БНТ.

а — при включении силового трансформатора под напряжение; б — при сквозном к. з. ($I_{\text{нам}}$ — ток намагничивания в первичной обмотке; I_p — ток намагничивания во вторичной обмотке; I_k — ток сквозного к. з. на плече дифференциальной защиты; $I_{\text{нб}}$ — ток небаланса в первичной обмотке; I'_p — ток небаланса во вторичной обмотке БНТ).

Ток срабатывания защиты должен отстраиваться от переменной составляющей переходных токов намагничивания и небаланса. В результате этого чувствительность защиты с насыщающимися трансформаторами оказывается выше, чем токовой отсечки. Опыт эксплуатации показывает, что ток срабатывания можно выбирать в пределах $(1 \div 2) I_{\text{ном.т.}}$. При этом предполагается, что трансформаторы тока подобраны по кривым предельной кратности.

Выше отмечалось, что реле РНТ-565 совмещает в себе устройство для выравнивания вторичных токов защиты и БНТ, питающий реле. Схема, поясняющая его включение, показана на рис. 16-30.

Обмотки w_d и w_2 образуют насыщающийся трансформатор; первая из них включается по дифференциальной схеме (на разность токов), а вторая — питает токовое реле P (типа РТ-40). Уравнительные обмотки w_y включаются в плечи защит и служат для выравнивания вторичных токов. В защитах двухобмоточных трансформаторов используется одна обмотка.

Число витков уравнивающей обмотки регулируется с помощью отпаяк и подбирается так, чтобы при внешнем к. з. ток в реле, а следовательно, и в обмотке w_2 отсутствовал, т. е. $I_p = I_2 = 0$. Для обеспечения этого условия намагничивающие силы уравнительной и дифференциальной обмоток должны уравниваться согласно выражению (16-16), или иначе говоря поток $\Phi_d = -\Phi_{y2}$.

Ток срабатывания защиты регулируется изменением числа витков обмотки w_d . На магнитопроводе реле РНТ имеется короткозамкнутая обмотка w_k . Она повышает отстройку реле от токов небаланса и бросков намагничивающих токов силового трансформатора особенно, когда эти токи не полностью сдвинуты относительно нулевой линии (рис. 16-30, г).

Подобные токи имеют значительную периодическую составляющую и относительно небольшую апериодическую, что понижает эффективность действия БНТ. Короткозамкнутая обмотка w_k ограничивает периодический ток, возникающий во вторичной обмотке РНТ, но не изменяет подмагничивающее действие апериодической составляющей.

Ток I_d , поступающий в первичную обмотку РНТ w_d (рис. 16-30, б), создает магнитодвижущую силу $F_d = I_d w_d$, которая образует в среднем стержне магнитный поток Φ_d , замыкающийся по крайним стержням 2 и 3 магнитопровода.

В общем случае ток I_d состоит из переменной $I_{d.p}$ и апериодической $I_{d.a}$, составляющих: $I_d = I_{d.p} + I_{d.a}$. Соответственно этому образуются две составляющие м. д. с. $F_{d.p}$ и $F_{d.a}$ и два магнитных потока $\Phi_{d.p}$ и $\Phi_{d.a}$.

Переменный поток $\Phi_{d.p}$, замыкаясь по стержню 2, наводит в обмотке w_2 , питающей реле Р, э. д. с. E_2 . Апериодический поток $\Phi_{d.a}$, медленно изменяющийся во времени, не создает э. д. с. в w_2 и полностью затрачивается на намагничивание магнитопровода.

При наличии короткозамкнутой обмотки (рис. 16-30, в) переменная составляющая потока $\Phi_{d.p}$ наводит в витках w_k э. д. с. E_k и ток I_k . Последний создает м. д. с. $F_k = I_k w_k$ и $F'_k = I_k w'_k$.

Магнитодвижущая сила F_k действует навстречу $F_{d.p}$ и почти полностью компенсирует ее. Результирующая м. д. с. $F_1 = F_{d.p} - F_k$ создает остаточный поток $\Phi_p \ll \Phi_{d.p}$ (где $\Phi_{d.p}$ — магнитный поток при отсутствии короткозамкнутой обмотки). Магнитодвижущая сила F'_k образует поток Φ'_k , замыкающийся вместе с составляющей потока Φ_p по стержню 2.

Параметры короткозамкнутой обмотки подбираются так, чтобы суммарный магнитный поток в стержне 2 $\Phi_2 = \Phi_{p2} + \Phi'_{k2}$ был меньше потока $\Phi_{d.p2}$. Здесь Φ_{p2} , Φ'_k и $\Phi_{d.p2}$ — составляющие магнитных потоков Φ_p , Φ_k и $\Phi_{d.p}$, замыкающиеся по стержню 2. Таким образом, короткозамкнутая обмотка уменьшает переменный магнитный поток, создаваемый шрипидическим током $I_{d.p}$, питающим обмотку w_d .

На магнитодвижущую силу $F_{d.a}$, создаваемую апериодическим током $I_{d.a}$, короткозамкнутая обмотка w_k не влияет, так как скорость изменения тока $I_{d.a}$ очень мала и поэтому ток $I_{d.a}$ не вызывает в ней э. д. с. Это означает, что поток $\Phi_{d.a}$, создаваемый $F_{d.a} = I_{d.a} w_d$, и его подмагничивающее действие практически не зависят от короткозамкнутой обмотки.

Короткозамкнутая обмотка уменьшает трансформацию периодической составляющей тока в реле и не влияет на величину и действие апериодической составляющей. Влияние обмотки w_k равноценно уменьшению периодического тока в обмотке w_d с $I_{d.p}$ до некоторой величины $I'_{d.p}$ при сохранении неизменной $I_{d.a}$

Изменением сопротивления r меняются величины тока I_K и его фаза относительно первичного тока $I_{д.п.}$. Это позволяет регулировать влияние короткозамкнутой обмотки на работу реле.

Варианты схем включения обмоток реле РНТ (рис. 16-32). В дифференциальной защите двухобмоточных трансформаторов (или автотрансформаторов) для компенсации неравенства токов в плечах защиты достаточно использовать только одну уравнивающую обмотку (например, $w_{уII}$), включая ее в плечо с меньшим током (рис. 16-32, а).

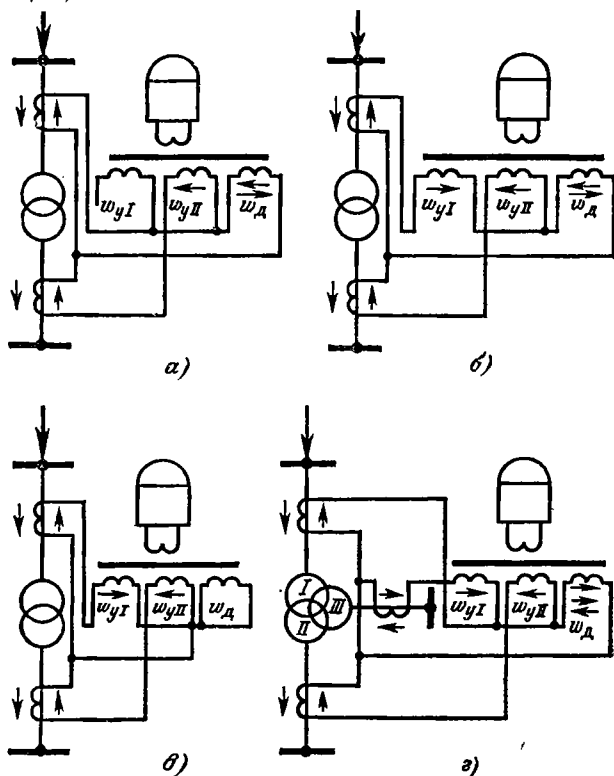


Рис. 16-32. Варианты схем включения обмоток реле РНТ-565. На рис. 16-32, а обмотка w_d размыкается и отсоединяется от схемы.

Для повышения точности компенсации применяются схемы с включением уравнивающей обмотки в каждое плечо защиты, при этом дифференциальная обмотка, как и в предыдущей схеме, включается на разность токов плеч (рис. 16-32, б) и, наконец, возможна схема с использованием только уравнивающих обмоток w_{yI} и w_{yII} по рис. 16-32, в.

В схемах защиты трехобмоточных трансформаторов (рис. 16-32, г) используются дифференциальная и обе уравнивающие

обмотки. Последние включаются в плечи *II* и *III* с меньшими токами. Плечо *I* с большим током подсоединяется непосредственно к дифференциальной обмотке реле.

Выбор параметров защиты: коэффициентов трансформации трансформаторов тока, тока срабатывания защиты и витков дифференциальной и уравнивательных обмоток (рис. 16-30, а) [1.5, 6, 10].

1. Определяются коэффициенты трансформации трансформаторов тока первой и второй групп n_{TI} и n_{TII} из условия, что трансформаторы тока должны длительно допускать протекание номинального тока защищаемого трансформатора (или автотрансформатора) и обеспечивать равенство токов в плечах защиты согласно (16-116) и (16-12).

В схемах защиты, в которых обе группы трансформаторов тока (первая и вторая) соединены в звезду, коэффициенты трансформации n_{TI} и n_{TII} определяются по выражению

$$n_{TI} = \frac{I_{номI}}{5} \quad \text{и} \quad n_{TII} = \frac{I_{номII}}{5}, \quad (16-21)$$

где $I_{номI}$ и $I_{номII}$ — номинальные токи силового трансформатора, отнесенные к напряжению той стороны, где установлены рассматриваемые трансформаторы тока.

Номинальные токи силовых трансформаторов находятся по их номинальной мощности $S_{ном}$, а автотрансформаторов — по их проходной мощности $S_{прох}$.

По расчетным значениям n_{TI} и n_{TII} выбираются стандартные трансформаторы тока с тем же или ближайшим большим n_T .

В дифференциальных защитах, у которых одна группа трансформаторов тока соединена в треугольник, а вторая — в звезду, коэффициент трансформации n_{TII} второй группы выбирается по выражению (16-21).

Первая группа, соединенная по схеме треугольника, должна длительно выдерживать номинальный ток обмотки силового трансформатора, соединенной в звезду ($I_{номI}$). Этому условию удовлетворяет трансформатор тока с коэффициентом трансформации $n_{TI} \geq I_{номI}/5$. Однако для обеспечения равенства токов в плечах защиты [по условию (16-12)] расчетный коэффициент n_{TI} принимается в $\sqrt{3}$ раз большим по выражению

$$n_{TI} = \frac{\sqrt{3} I_{номI}}{5}. \quad (16-22)$$

В соответствии с этим выбирается стандартный трансформатор тока с $n_T \approx n_{TI}$.

2. Определяются токи в плечах защиты (I_{IB} и I_{IIB}) при прохождении по защищаемому трансформатору сквозного номинального тока. Ток в плече трансформаторов тока, соединенных в звезду, $I_{IIB} = I_{номII}/n_{TII}$, ток в плече треугольника

$$I_{IB} = \frac{I_{номI}}{n_{TI}} \sqrt{3}, \quad \text{при этом} \quad I_{номI} = I_{номII}/N.$$

Плечо с большим током называется основным, в дальнейшем будем считать, что основным является плечо *I* (рис. 16-30, а).

Если токи I_{IB} и I_{IIB} различаются больше чем на 5%, то предусматривается компенсация их различия с помощью уравнивательных обмоток трансформатора в РНТ.

3. Выбирается ток срабатывания защиты. Он должен быть отстроен от броска намагничивающего тока защищаемого трансфор-

матора или автотрансформатора и от максимального тока небаланса при внешнем к. з.

По первому условию

$$I_{с.з} = k_H I_{\text{нам.т.}} \quad (16-23)$$

На основании опыта эксплуатации и специальных экспериментов установлено, что при наличии БНТ ток намагничивания $I_{\text{нам.т.}}$, попадающий в реле, не содержит апериодической составляющей и поэтому ток в реле не превышает $(1 \div 1,5) I_{\text{ном.т.}}$. С учетом этого принимается

$$I_{с.з} = k_H I_{\text{ном.т.}} = (1,2 \div 2) I_{\text{ном.т.}} \quad (16-24)$$

При защите автотрансформаторов ток $I_{\text{ном.т.}}$ определяется по типовой мощности автотрансформатора.

По второму условию

$$I_{с.з} = k_H I_{\text{нб.макс.}} \quad (16-25)$$

Расчетное значение $I_{\text{нб.макс.}}$ оценивается по выражению (16-20а) в предположении, что составляющая $I_{\text{нб.комп}} = 0$. Ток срабатывания принимается равным большему из двух значений (16-24) и (16-25).

По выбранному первичному току срабатывания защиты находится вторичный ток срабатывания реле:

$$I_{с.р} = \frac{I_{с.з}}{n_T} k_{сх}, \quad (16-26)$$

где n_T — коэффициент трансформации трансформаторов тока на той стороне защищаемого трансформатора, для которой подсчитан $I_{с.р}$; $k_{сх}$ — коэффициент, учитывающий схему соединения трансформаторов тока; при соединении в звезду $k_{сх} = 1$, при схеме треугольника $k_{сх} = \sqrt{3}$.

4. Определяется число витков дифференциальной и уравнивательных обмоток РНТ:

а) Сначала определяются витки обмоток реле, по которым протекает ток $I_{\text{Iв}}$ основного плеча защиты ($w_{\text{осн}}$).

В схеме, использующей только одну уравнивательную обмотку $w_{\text{уII}}$ (рис. 16-32, а), ток основного плеча замыкается по дифференциальной обмотке и поэтому $w_{\text{осн}} = w_{\text{д}}$, в схеме, показанной на рис. 16-32, б $w_{\text{осн}} = w_{\text{уI}} + w_{\text{д}}$.

Число витков основной обмотки $w_{\text{осн}}$ находится из уравнения, характеризующего условия срабатывания реле.

Если обозначить н. с., необходимую для срабатывания реле $F_{с.р}$, то условием действия реле будет равенство

$$I_{с.р} w_{\text{осн}} = F_{с.р} \quad (16-27)$$

Для реле типа РНТ-565 $F_{с.р} = 100$ А. Зная из предыдущего расчета ток срабатывания реле на основной стороне защиты, нетрудно определить число витков $w_{\text{осн}}$, необходимое для действия реле при этом токе, из (16-27).

По полученному значению $w_{\text{осн}}$ находится $w_{\text{д}}$. В схеме без уравнивательной обмотки в основном плече защиты $w_{\text{д}} = w_{\text{осн}}$. В схеме, предусматривающей включение обмотки $w_{\text{уI}}$ в основное плечо, $w_{\text{д}} = w_{\text{осн}} - w_{\text{уI}}$. Величинами $w_{\text{уI}}$ задаются. Если на дифференциальной обмотке реле РНТ нет ответвлений с числом витков, равным расчетному, то принимается ближайшее меньшее число витков.

б) Определяется расчетное число витков обмоток РНТ, по которым проходит ток неосновного плеча. Указанные витки находятся из уравнения (16-16) баланса н. с. при внешнем к. з. при условии, что по обеим обмоткам защищаемого трансформатора проходят равные номинальные мощности $S_{\text{ном}}$.

Уравнение (16-16) можно преобразовать, сгруппировав в нем члены с $I_{\text{Iв}}$ и $I_{\text{IIв}}$, тогда оно примет вид:

$$I_{\text{Iв}} (w_{\text{уI}} + w_{\text{д}}) = I_{\text{IIв}} (w_{\text{уII}} + w_{\text{д}}).$$

Учитывая, что $w_{yI} + w_d = w_{осн}$ и $w_{yII} + w_d = w_{IIрасч}$, получаем:

$$I_{IB}w_{осн} = I_{IIB}w_{IIрасч}.$$

Отсюда

$$w_{IIрасч} = \frac{I_{IB}}{I_{IIB}} w_{осн}. \quad (16-28)$$

Зная из предыдущего расчета I_{IB} , I_{IIB} и $w_{осн}$, определяем $w_{IIрасч}$, а затем $w_{yII} = w_{IIрасч} - w_d$.

Расчет защиты трехобмоточных трансформаторов ведется аналогично, но в два приема. Сначала считают, что отключена обмотка III (рис. 16-32, а) и определяют по (16-27) и 16-28) $w_{осн}$ и $w_{IIрасч}$, затем принимают, что отключена обмотка II и из условия баланса н. с. при внешнем к. з. $I_{IB}w_d = I_{IIB}(w_{yII} + w_d)$ находят w_{yII} .

5. Определяется величина тока небаланса $I_{нб.комп}$, обусловленная неточностью подбора w_{yI} и w_{yII} .

Этот небаланс подсчитывается в общем случае по выражению

$$I_{нб.комп} = \frac{w_{IIрасч} - w_{yI}}{w_{IIрасч}} I_{Iк.з.макс} + \frac{w_{IIрасч} - w_{yII}}{w_{IIрасч}} I_{IIк.з.макс}, \quad (16-29)$$

где w_{yI} и w_{yII} — принятые к установке числа витков уравнильных обмоток РНТ; $I_{Iк.з.макс}$ и $I_{IIк.з.макс}$ — токи к. з., протекающие при внешнем к. з. по той стороне силового трансформатора, куда включены обмотки w_{yI} и w_{yII} соответственно.

Сопоставляются фактические значения $I_{с.з}$ и $I_{нб}$ (с учетом $I_{нб.комп}$). Если $I_{с.з}$ окажется недостаточно отстроенным от $I_{нб}$, то необходимо заглубить защиту и провести пересчет параметров.

6. Проверяется чувствительность защиты при к. з. в ее зоне. Чувствительность характеризуется коэффициентом k_q , который равен отношению результирующей н. с., создаваемой токами плечей, по которым протекает ток при рассматриваемом к. з., к н. с. срабатывания реле:

$$k_q = \frac{\Sigma I_{п}(w_y + w_d)}{F_{с.р}}, \quad (16-30)$$

где $I_{п}$ — ток в плечах защиты при рассматриваемом к. з. в зоне; w_y — витки уравнильной обмотки соответствующего плеча.

В качестве расчетного случая выбирается режим, при котором токи в плечах и результирующая н. с. реле оказываются наименьшими. Для этой цели в большинстве случаев рассматривается режим одностороннего питания трансформатора. При этом чувствительность может оцениваться по отношению токов:

$$k_q = \frac{I_{к.з.мин} k_{сх}}{I_{с.з}}; \quad (16-31)$$

здесь $k_{сх}$ учитывает схему соединений трансформаторов тока на стороне, по которой протекает ток к. з. $I_{к.з}$.

В соответствии с ПУЭ допускается $k_q \geq 2$.

При недостаточной чувствительности из-за большого значения тока небаланса приходится применять более сложные реле с торможением.

Числовые примеры расчета уставок приведены в [Л. 6,22].

г) Дифференциальная защита с реле, имеющими торможение

В дифференциальных защитах, установленных на трансформаторах с регулированием напряжения под нагрузкой или многообмоточных трансформаторах с несколькими питающими обмот-

ками, токи небаланса в установившемся режиме имеют значительную величину. В этих случаях дифференциальная защита с реле, включенными через БНТ, получается малочувствительной вследствие того, что ее ток срабатывания приходится увеличивать до 3—4-кратного значения номинального тока трансформатора. Чувствительность дифференциальной защиты в указанных случаях может быть повышена применением дифференциальных реле с торможением. Принцип действия таких реле был рассмотрен в гл. 10.

Схема и характеристики дифференциальной защиты с торможением. Схема защиты для двух- и трехобмоточного трансформаторов показана на рис. 16-33. Рабочая обмотка реле включается

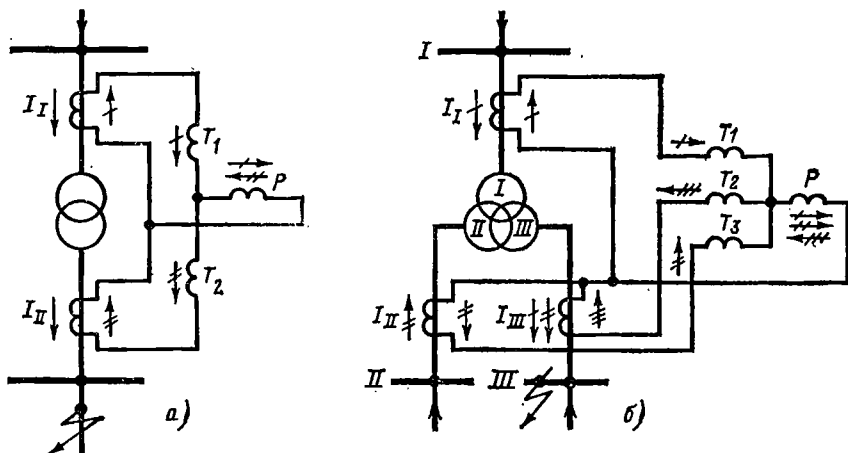


Рис. 16-33. Дифференциальная защита с торможением.

а — для двухобмоточного трансформатора; б — для трехобмоточного трансформатора.

дифференциально, т. е. на разность токов трансформаторов тока, а тормозные — в плечи дифференциальной защиты с таким расчетом, чтобы в любом случае внешнего к. з. хотя бы одна тормозная обмотка реле обтекалась током сквозного к. з. При этих условиях ток срабатывания защиты (т. е. ток в рабочей обмотке, необходимый для действия защиты) под влиянием тока, протекающего в тормозной обмотке реле, возрастает, что повышает надежность отстройки защиты от появляющихся в этом случае токов небаланса (рис. 16-34).

При к. з. в зоне ток повреждения I_k , протекающий по тормозным обмоткам, за г р у б л я е т реле (увеличивает его $I_{с.р.}$) так же, как и в условиях внешнего к. з., но несмотря на это чувствительность тормозного реле оказывается выше, чем у реле с БНТ без торможения, что видно из диаграммы, приведенной на рис. 16-34 (точки а и б). Чувствительность тормозного реле при к. з. в зоне можно повысить, если тормозные обмотки вклю-

чать не во все плечи защиты (как показано на рис. 16-33), а только там, где это необходимо для торможения при внешних к. з. Например, если у защиты двухобмоточного трансформатора (рис. 16-33, а) включить только одну тормозную обмотку T_2 (в плечо, по которому при повреждении в зоне ток $I_T = 0$), то при внешнем к. з. торможение будет, а при к. з. в зоне оно отсутствует и реле будет срабатывать при токе $I_p = I_0$, т. е. при меньшем токе, чем при наличии тормозной обмотки T_1 . Чувствительность тормозного реле можно повысить и на трехобмоточном трансформаторе, если не включать тормозной обмотки T_1 .

Для обеспечения достаточной надежности действия защиты при повреждениях в зоне и селективности при внешних к. з. коэффициент торможения, характеризующий наклон характеристики реле (рис. 16-34), принимается равным 30—60%, а начальный ток $I_{с.р0}$ при $I_T = 0$ выбирается равным 1,5—2 А, т. е. 30—40% $I_{ном. т.т.}$.

Однако наличие торможения не устраняет возможности срабатывания реле от бросков намагничивающего тока, так как в этом случае ток в рабочей обмотке равен току в тормозной обмотке, что соответствует условиям к. з. в зоне защиты.

Наряду с этим торможение при внешних к. з. оказывается

часто недостаточным для предотвращения ложного действия защиты под влиянием сильно возрастающих переходных токов небаланса. Для устранения этих недостатков тормозных реле в СССР разработана конструкция дифференциальных реле, сочетающих в себе принципы торможения с принципом отстройки от апериодических токов при помощи БНТ. Успешное решение этой задачи привело к разработке в Новочеркасском политехническом институте имени Орджоникидзе оригинальной конструкции реле с магнитным торможением, показанной на рис. 16-35 [Л. 66, 72].

Реле с магнитным торможением. Реле (рис. 16-35) состоит из трехстержневого насыщающегося трансформатора 1, питающего обмотку электромагнитного реле 2. Насыщающийся трансформатор имеет, как и обычный БНТ, первичную рабочую обмотку w_p и вторичную обмотку w_2 , в цепь которой включено дифференциальное реле. Для осуществления торможения на магнитопровод насыщающегося трансформатора насажена третья — тормозная обмотка w_T . Рабочая обмотка включается дифференциально, а тормозная — в рассечку плеча токовой цепи защиты, т. е. так же, как соответствующие обмотки обычного тормозного реле.

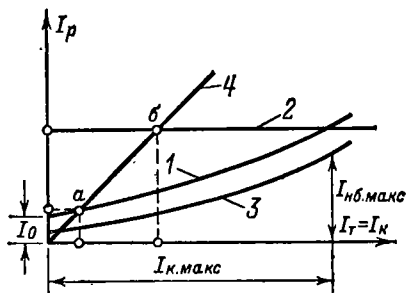


Рис. 16-34. Характеристика реле с торможением.

1 — характеристика реле с торможением; 2 — характеристика реле с БНТ без торможения; 3 — ток небаланса; 4 — ток в реле при к. з. в зоне.

Тормозная и вторичная обмотки реле состоят из двух секций: *A* и *B*, расположенных на крайних стержнях магнитопровода. Рабочая обмотка помещена на среднем стержне.

Секции w_{TA} и w_{TB} тормозной обмотки соединены так, что создаваемый ими магнитный поток Φ_T замыкается по крайним стержням. Поток Φ_T наводит в секциях w_{2A} и w_{2B} вторичной обмотки э. д. с. E_{TA} и E_{TB} , которые, однако, взаимно уничтожаются, так как они равны по величине и взаимно противоположны по направлению. В результате этого ток тормозной обмотки не создает тока в реле и служит только для подмагничивания крайних стержней магнитопровода, насыщая их и ухудшая трансформацию тока из рабочей обмотки во вторичную.

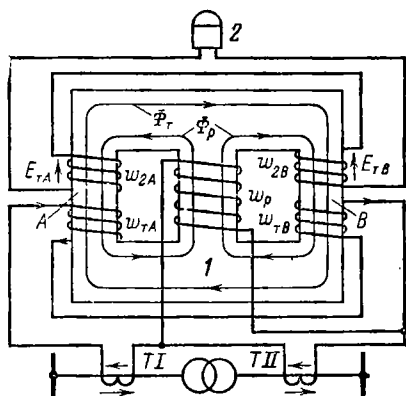


Рис. 16-35. Реле с магнитным торможением.

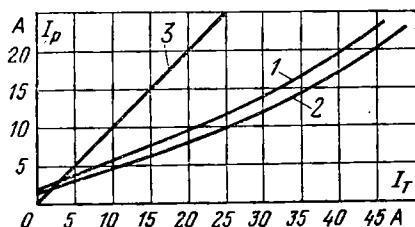


Рис. 16-36. Характеристики реле с магнитным торможением.

1 — при совпадении по фазе I_p и I_T ; 2 — при сдвиге фазы на 90° ; 3 — ток в рабочей обмотке, равный I_K при к. з. в зоне.

требуется для действия реле. Эта связь выражается уравнением $I_p = k_T I_T$ и изображается графически кривой 1 на рис. 16-36.

Параметры трансформатора подбираются с таким расчетом, чтобы коэффициент торможения $k_T = 30 \div 60\%$; его величина остается постоянной в пределах от 10 до 50 А, увеличиваясь при больших значениях тормозного тока. При отсутствии тока в тормозной обмотке рассматриваемое реле работает как обычное реле с БНТ.

Поток Φ_p , создаваемый рабочей обмоткой, замыкается по крайним стержням и наводит в секциях вторичной обмотки согласно направленным э. д. с., обуславливающие ток в реле. Поток

$$\Phi_p = \frac{I_p w_p}{R_m}.$$

Отсюда следует, что ток I_p , необходимый для создания потока Φ_p , достаточного для действия реле 2, зависит от магнитного сопротивления R_m , которое увеличивается с насыщением крайних стержней магнитопровода, вследствие подмагничивания их током I_T тормозной обмотки. Чем больше ток I_T , тем больший ток I_p

При внешнем к.з. ток, проходящий по тормозной обмотке, насыщает крайние стержни магнитопровода, в результате чего ток срабатывания реле возрастает, одновременно с этим ухудшается трансформация тока небаланса, появляющегося в рабочей обмотке трансформатора.

При повреждении в зоне защиты ток в рабочей обмотке равен или больше тока I_T ; в этих условиях, несмотря на подмагничивание магнитопровода, в реле появляется ток, достаточный для его действия, что вытекает из характеристик, показанных на рис. 16-36.

Магнитная индукция при токе срабатывания реле достигает значения, при котором начинается насыщение магнитопровода (1,1—1,2 Т), благодаря чему апериодический ток почти не трансформируется во вторичную обмотку, как и в обычном БНТ. Поэтому рассмотренное реле не реагирует на апериодическую составляющую, содержащуюся в намагничивающем токе силового трансформатора и токе небаланса при неустановившихся режимах.

Важнейшими преимуществами реле являются: простота конструкции, хорошая тормозная характеристика, относительно небольшая зависимость $I_{с.р.}$ от фазы тормозных токов, надежная отстройка от апериодической составляющей токов намагничивания и возможность выполнения реле с тремя и более тормозными обмотками. Последнее решает задачу защиты многообмоточных трансформаторов.

Вследствие загробления реле и уменьшения тока небаланса, поступающего в обмотку реле, повышается отстройка защиты от токов небаланса.

Отечественная промышленность выпускает реле типа ДЗТ, основанные на рассмотренном принципе. Эти реле содержат в себе трансформатор для выравнивания токов в плечах защиты. Имеются реле с одной тормозной обмоткой ДЗТ-11, предназначенные для двухобмоточных трансформаторов, с тремя (ДЗТ-13) и четырьмя (ДЗТ-14) тормозными обмотками, применяемые на многообмоточных трансформаторах.

16-9. КРАТКАЯ ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Основное преимущество дифференциальных защит трансформаторов состоит в том, что они обеспечивают быстрое и селективное отключение повреждений как в самом трансформаторе, так и на его выводах и в токоведущих частях к его выключателям.

Основным видом защиты следует считать защиту с простым реле, включаемым через БНТ.

На маломощных трансформаторах можно для упрощения применять дифференциальные отсечки (без БНТ).

На трансформаторах с регулировкой под нагрузкой и трехобмоточных трансформаторах с двух- и трехсторонним питанием

защиты простые реле с БНТ должны загрубляться до $(2 \div 3) I_{ном.}$ При необходимости повысить чувствительность защиты надлежит применять тормозные реле с БНТ (типа ДЗТ).

16-10. ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

а) Принцип действия и устройство газового реле

Газовая защита получила широкое распространение в качестве весьма чувствительной защиты от внутренних повреждений трансформаторов. Повреждения трансформатора, возникающие внутри его кожуха, сопровождаются электрической дугой или нагревом деталей, что приводит к разложению масла и изоляционных материалов и образованию летучих газов. Будучи легче масла, газы поднимаются в расширитель 2, который является самой высокой частью трансформатора (рис. 16-37) и имеет сообщение с атмосферой.

При интенсивном газообразовании, имеющем место при значительных повреждениях, бурно расширяющиеся газы создают сильное давление, под влиянием которого масло в кожухе трансформатора приходит в движение, перемещаясь в сторону расширителя.

Таким образом, образование газов в кожухе трансформатора

Рис. 16-37. Установка газового реле на трансформаторе.

1 — газовое реле; 2 — расширитель.

и движение масла в сторону расширителя могут служить признаком повреждения внутри трансформатора. Эти признаки используются для выполнения специальной защиты при помощи газовых реле, реагирующих на появление газа и движение масла. Газовое реле 1 устанавливается в трубе, соединяющей кожух трансформатора с расширителем так, чтобы через него проходили газ и поток масла, устремляющиеся в расширитель при повреждениях в трансформаторе.

Конструкции газовых реле имеют три разновидности, различающиеся принципом исполнения реагирующих элементов. Первоначально применялись реле с реагирующим элементом в виде поплавка, затем появились реле, у которых реагирующим элементом служит лопасть, в последнее время применяются реле с реагирующим элементом, имеющим вид чашки.

Устройство поплавкового газового реле показано на рис. 16-38. Реле состоит из чугунного кожуха 1, имеющего вид тройного патрубка с фланцами для соединения с трубой к расширителю. Внутри кожуха реле расположены два подвижных поплавка 2а

и 2б, выполненные в виде тонкостенных полых цилиндров, герметически запаенных и плавающих в масле. Каждый поплавок свободно вращается на оси, закрепленной на стойке. На торце поплавков располагаются ртутные контакты 3, представляющие собой стеклянные колбочки с впаянными в нее контактами и ртутью внутри.

При определенном положении поплавков ртуть замыкает контакты. Выводы от контактов на наружную сторону кожуха выполнены с помощью гибких и изолированных проводников, которые не должны ограничивать свободного вращения поплавков. Контакты верхнего поплавка действуют на сигнал, а нижнего — на отключение трансформатора. Верхний поплавок находится в верхней части кожуха реле, нижний располагается на уровне соединительной трубы к расширителю так, чтобы поток масла мог воздействовать на него.

Принцип действия реле. Кожух реле находится ниже уровня масла в расширителе, поэтому он всегда заполнен маслом. Поплавки, стремясь всплыть, занимают самое верхнее положение, возможное по условиям их крепления на оси. При этом положении поплавков контакты реле разомкнуты.

При небольших повреждениях образование газа происходит медленно, и он небольшими пузырьками поднимается к расширителю трансформатора. Проходя через реле, пузырьки газа заполняют верхнюю часть его кожуха, вытесняя оттуда масло. По мере понижения уровня масла верхний контакт опускается и через некоторое время, зависящее от интенсивности газообразования, поплавок достигает такого положения, при котором его контакт замыкается.

Если повреждение трансформатора значительное, то под влиянием давления, создаваемого бурно образующимися газами, масло приходит в движение, сообщая толчок нижнему поплавку. Под его воздействием поплавок мгновенно замыкает свои контакты, посылая импульс на отключение. Движение масла может носить толчкообразный характер, поэтому контакты нижнего поплавка замыкаются кратковременно. Чтобы обеспечить продолжительность импульса, достаточную для отключения выключателя, применяется особая схема, обеспечивающая самоудержание выходного промежуточного реле Π_1 на время, достаточное для отключения выключателей. Подобная схема приведена на рис. 16-39. Газовое реле подает кратковременный ток в шунтовую обмотку 1 промежуточного реле Π_1 , последнее сраба-

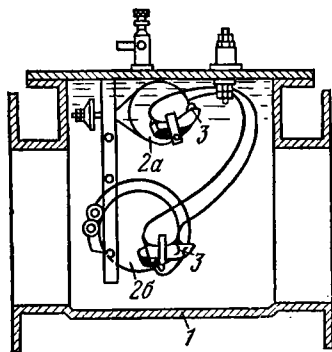


Рис. 16-38. Устройство поплавкового газового реле.

нальный элемент. При таком исполнении исключается ложное действие отключающего элемента реле из-за нарушения герметичности поплавка и попадания в него масла, но при этом ухудшаются защитные свойства реле. Лопастные реле распространены за границей. Реле, показанное на рис. 16-40, а, разработано в Горэнерго.

Реле с чашкообразными элементами. Сигнальный и отключающий элементные реле представляют собой открытые плоскостонные алюминиевые чашки 1 и 2 (рис. 16-40, б). Каждая чашка закреплена на оси 3 и может вращаться вокруг нее. С корпусом чашки связан подвижной контакт 5 на нижнем и 4 на верхнем элементе. При опускании чашки подвижной контакт замыкается с неподвижным 7 или 6. Движению чашек на

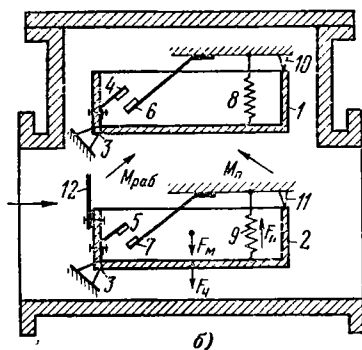
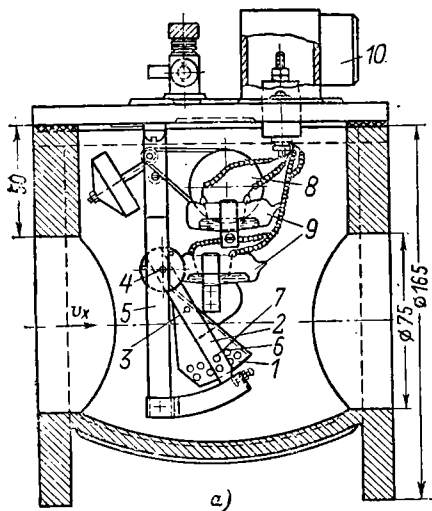


Рис. 16-40. Устройство лопастного реле (а) и устройство реле с чашкообразными элементами (б).

а: 1 — лопасть; 2 — рамка; 3 — ось лопатки; 4 — ось рамки; 5 — стойка; 6 — отверстие для изменения наклона лопасти; 7 — штифт для фиксации положения лопасти; 8 — сигнальный поплавок; 9 — ртутные контакты; 10 — коробка для выводов.

закрытие контактов противодействуют пружины 8 и 9, тянущие чашки вверх. Для ограничения движения чашек под действием пружины предусмотрены упоры 10 и 11. На нижней чашке 2 имеется лопасть 12, вращающаяся на оси. Если в кожухе реле и в чашках нет масла, то момент пружины $M_{\text{ц}}$ преодолевает рабочий момент $M_{\text{раб}}$, создаваемый весом корпуса чашки. В этом случае $M_{\text{ц}} > M_{\text{раб}}$ и контакты обоих элементов разомкнуты. Если кожух реле, а следовательно, и чашки заполнены маслом, то за счет потери веса тела, погруженного в жидкость, $M_{\text{раб}}$ уменьшается и момент пружин $M_{\text{ц}}$ еще более превосходит $M_{\text{раб}}$. При понижении уровня масла момент $M_{\text{раб}}$ увеличивается за счет веса находящегося в чашке масла, суммарная сила веса чашки и масла $F_{\text{ч}} + F_{\text{м}}$ преодолевает противодействие пружины ($M_{\text{раб}} > M_{\text{ц}}$), чашка опускается и замыкает свои кон-

такты. При бурном газообразовании под действием силы, созданной потоком масла или газов, лопасть 12 поворачивается и замыкает контакты 4—7.

Чашечные реле не имеют недостатка, присущего поплавковой конструкции, действующей ложно при нарушении герметичности поплавков. Реле работает при понижении уровня масла, имеет удобную регулировку чувствительности и в меньшей степени, чем реле со ртутными контактами, реагирует на вибрацию корпуса трансформатора. Завод ЗТЗ выпускает реле с чашечковыми элементами типа РГЧЗ-66. Чувствительность нижнего элемента (лопасти) регулируется в пределах от 0,6 до 1,2 м/с. Время действия реле при работе лопасти колеблется от 0,5 до 0,05 с в зависимости от скорости движения масла.

б) Особенности газовой защиты

По своему принципу действия газовая защита может работать не только при повреждениях и опасных ненормальных режимах, но и при появлении в кожухе трансформатора воздуха, при толчках (движениях) масла, вызванных любой причиной, и механических сотрясениях, имеющих место вследствие вибрации корпуса трансформатора. Воздух попадает в кожух трансформатора при доливке масла, ремонте трансформатора с перезаливкой масла и т. п. В дальнейшем при включении трансформатора под нагрузку температура масла начинает повышаться, находящийся в масле воздух прогревается и поднимается к расширителю. Попадая в реле, воздух может вызвать срабатывание верхнего (сигнального) контакта, а при быстром движении — нижнего, который неправильно отключит трансформатор.

Для предупреждения неправильного отключения трансформатора отключающая цепь защиты после доливки масла или включения нового трансформатора переводится на сигнал (на 2—3 суток) до тех пор, пока не прекратится выделение воздуха, отмечаемое по работе защиты на сигнал.

Толчки масла, не связанные с повреждением трансформатора, могут возникать при внешних коротких замыканиях, например, от смещения обмоток вследствие динамических усилий; при пуске и остановке насосов, обеспечивающих циркуляцию масла (у трансформаторов с искусственным охлаждением масла), и по ряду других причин.

Неправильная работа нижнего поплавка реле от толчков масла, не связанных с повреждением трансформатора, может быть устранена его заглублением.

Опыт эксплуатации защиты и ее исследования, проведенные ОРГРЭС и рядом энергосистем, показывают, что неправильная работа защиты от толчков масла наблюдалась на реле, реагирующих на движение масла со скоростью 20—15 см/с. Более грубые

реле, реагирующие на скорость 50 см/с и выше, как правило, ложно не работают.

В настоящее время принято регулировать чувствительность нижнего поплавка на скорость 50—160 см/с.

На трансформаторах и автотрансформаторах большой мощности (240—400 МВ·А) наблюдается повышенная вибрация корпуса. Реле ПГ-22 и РГЗ-22 недостаточно виброустойчивы и, как показал опыт эксплуатации, работают ненадежно на трансформаторах с повышенной вибрацией.

В процессе эксплуатации необходимо следить за герметичностью баллончиков у реле поплавкового типа. При ее нарушении масло попадает внутрь поплавка, он теряет плавучесть и опускается, замыкая контакты. Такие дефекты наблюдались в эксплуатации; в связи с этим у вновь включаемых реле и периодически у реле, находящихся в эксплуатации, герметичность баллончиков проверяется помещением их в нагретое масло при избыточном давлении (0,5—1 кгс/см²).

в) Требования к монтажу защиты

На трансформаторах, снабженных газовым реле, бак (кожух) трансформатора должен устанавливаться наклонно, так чтобы край трансформатора, связанный с расширителем, и сама труба к расширителю имели подъем на 1,5—2% (рис. 16-36). Этим обеспечивается беспрепятственный проход газов в расширитель при повреждениях и предотвращается возможность скопления пузырьков воздуха под крышкой кожуха трансформатора, которое может повлечь за собой ложное действие защиты.

Особое внимание должно обращаться на разделку кабеля, отходящего от выводов реле. Опыт показывает, что в разделку кабеля газовой защиты может попадать масло из трансформатора. Оно разъедает резиновую изоляцию жил кабеля, что приводит к замыканию между ними и неправильному отключению трансформатора. Поэтому вывод из газового реле можно выполнять только кабелем с бумажной изоляцией (КСБ или КСГ).

На открытых подстанциях следует обеспечить надежную защиту выводов на крышке газовых реле от попадания на них влаги.

г) Оценка газовой защиты

Основными достоинствами газовой защиты являются: простота ее устройства, высокая чувствительность, малое время действия при значительных повреждениях, действие на сигнал или отключение в зависимости от размеров повреждения.

Газовая защита является наиболее чувствительной защитой трансформатора от повреждений его обмоток и особенно при витковых замыканиях, на которые дифференциальная защита реагирует только при замыкании большого числа витков, а максималь-

ная защита и отсечка не реагируют совсем. В настоящее время все трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше поставляются вместе с газовой защитой.

Газовая защита не действует при повреждениях на выводах трансформатора и должна выводиться из действия, когда имеется опасность выделения воздуха в кожухе трансформатора (т. е. после доливки масла, ремонта трансформатора и включения его вновь). По этим причинам газовая защита должна дополняться второй защитой от внутренних повреждений. Для маломощных трансформаторов такой защитой служат максимальная защита и токовая отсечка. Для мощных трансформаторов применяется более совершенная дифференциальная защита.

Газовая защита не только применяется для защиты трансформаторов и автотрансформаторов, но также считается обязательной на маслонаполненных реакторах и дугогасящих катушках.

16-11. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА КОРПУС (КОЖУХ) ТРАНСФОРМАТОРА

В сети с глухозаземленной нейтралью иногда применяется защита, показанная на рис. 16-41, реагирующая на любые замыкания на корпус трансформатора [Л. 73].

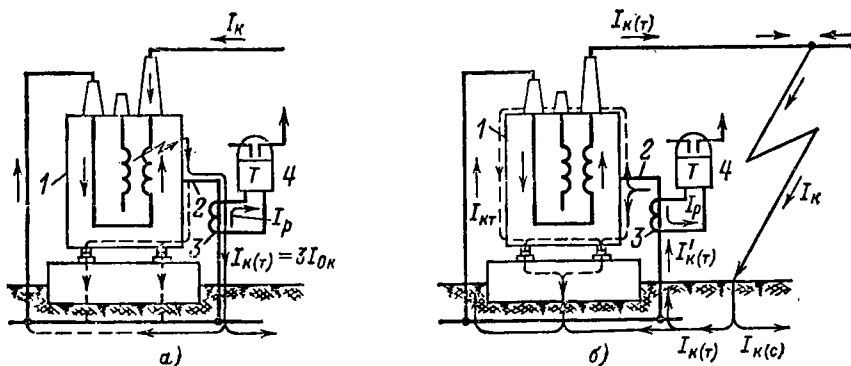


Рис. 16-41. Токковая защита от замыканий на корпус трансформатора.

а — токораспределение при к. з. на трансформаторе; б — токораспределение при внешнем к. з.

Для выполнения защиты корпус трансформатора 1 связывается с землей (заземляющим контуром подстанции) специальной шиной 2. Кроме этой связи корпус трансформатора не должен иметь других соединений с землей.

Трансформатор устанавливается, как обычно, на железобетонном фундаменте, который является достаточной изоляцией при условии, что металлическая арматура фундамента не имеет связи с землей. Специальных мер для изоляции кожуха трансформатора от фундамента не требуется, если сопротивление изоляции корпуса трансформатора от земли составляет 15—20 Ом.

На заземляющей шине устанавливается трансформатор тока 3, к которому подключается токовое реле 4.

При замыкании на корпус наружных выводов или обмотки трансформатора (рис. 16-41, а) большая часть тока повреждения $I_{K(T)}$ проходит на землю через заземляющую шину. В реле 4 появляется большой ток $I_p = 3I_{0K}$, и оно срабатывает, действуя на отключение трансформатора.

При к. з. в сети (рис. 16-41, б) часть тока повреждения $I'_{K(T)}$ также замыкается через шину, кожух и фундамент, на котором установлен трансформатор.

Для исключения неправильной работы защиты при внешних к. з. ток срабатывания реле 4 должен удовлетворять условию

$$I_{с.з} > I'_{K.т.} \quad (16-32)$$

При повреждениях трансформатора, сопровождающихся замыканием на корпус, защита будет действовать, если

$$I_{с.з} < I_{K(T)}. \quad (16-33)$$

Рассмотренная защита довольно широко применяется во Франции, США и некоторых других странах. Опыт эксплуатации такой защиты в СССР пока очень мал. Несмотря на простоту схемы защиты, она не получила распространения в Советском Союзе из-за возможности ложной работы при нарушении изоляции между корпусом трансформатора и фундаментом.

16-12. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА СТОРОНЕ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Общие положения

Схемы питания и способы отключения трансформаторов без выключателей. В последнее время получили широкое распространение однострановые и двухтрансформаторные подстанции

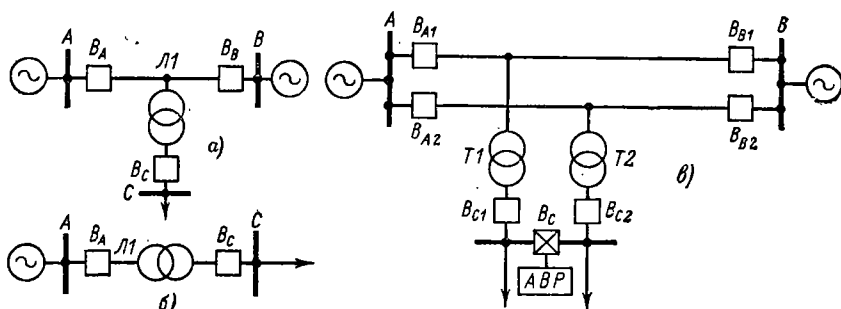


Рис. 16-42. Схемы подключения трансформаторов без выключателя на стороне высшего напряжения.

а — на ответвлении от одной линии; б — по блочной схеме; в — на ответвлениях от двух параллельных линий.

ции, выполненные по упрощенной схеме — без выключателей со стороны высшего напряжения [Л. 62, 63].

Такие подстанции подключаются к сети с помощью ответвлений от линий или по блочной схеме линия — трансформатор (рис. 16-42, а, б).

В обоих случаях автоматическое отключение трансформаторов при его повреждении должно производиться выключателями B_A и B_B на питающих концах линии $Л1$ (рис. 16-42, a и b). Эту операцию возможно осуществить с помощью устройства, передающего отключающую команду от защиты трансформатора на выключатель линии по специальным каналам связи (рис. 16-43, a), или посредством короткозамыкателя, как показано на рис. 16-43, b . Суть второго способа (с короткозамыкателем $KЗ$) сводится к следующему. При повреждении в трансформаторе его защита $PЗ_T$ срабатывает и подает ток в катушку включения $KВ$ короткозамыкателя $KЗ$. Нож последнего замыкается и устраивает искус-

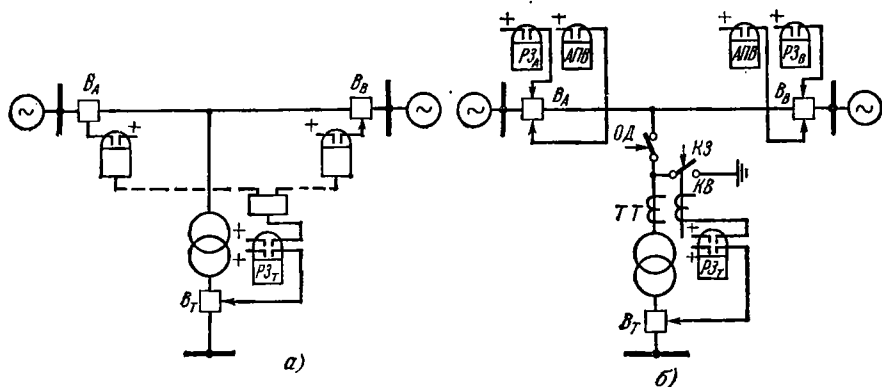


Рис. 16-43. Принципы осуществления защиты трансформаторов, подключенных к линии без выключателя на стороне высшего напряжения.

a — с помощью устройства передачи отключающей команды; b — с помощью короткозамыкателя и отделителя.

ственное к. з. На это к.з. реагируют защиты линии $PЗ_A$ и $PЗ_B$, отключающие линию и вместе с ней трансформатор.

Недостатком такого способа ликвидации повреждения является замедление отключения поврежденного трансформатора, обусловленное временем действия короткозамыкателя и защиты линии.

Следует отметить, что к. з. на выводах и в начальной части обмотки трансформатора обычно попадают в зону быстродействующей защиты линии и отключаются поэтому быстро без участия короткозамыкателя. Замедляющее действие короткозамыкателя сказывается при повреждениях в трансформаторе, на которые не реагирует быстродействующая защита линии.

Несмотря на указанный недостаток, схемы с короткозамыкателем получили широкое распространение.

Схема с передачей отключающих импульсов работает практически так же быстро, как и обычные схемы, непосредственно действующие на отключение выключателя трансформатора.

Из-за большой стоимости канала связи этот способ отключения применяется реже. Однако в тех случаях когда требуется быстрое отключение к. з., лучшим способом является передача отключающих импульсов на питающие концы линий электропередачи. На коротких линиях для передачи импульсов используются провода связи и телемеханики. На длинных линиях импульсы могут передаваться по каналам в. ч. (по этим же линиям) с помощью специальных устройств телеотключения.

Селективное отключение поврежденного трансформатора. В блочной схеме отключение линии при повреждении трансформатора не нарушает принципа селективности и не наносит ущерба электроснабжению, так как трансформатор и линия представляют единое целое.

В схеме же на рис. 16-42, а, где трансформатор подсоединен к ответвлению, отключение линии при повреждении в трансформаторе является неселективным, поскольку при этом не только отключается поврежденный трансформатор, но и нарушается связь между подстанциями *A* и *B*. Этот недостаток устраняется с помощью АПВ на линии и установки отделителя *ОД* на трансформаторе (рис. 16-43, б). Отделитель представляет собой разъединитель с дистанционным приводом, который допускает автоматическое отключение поврежденного трансформатора только после снятия с него напряжения.

При этом отключение поврежденного трансформатора происходит следующим образом. На возникшее повреждение реагирует защита трансформатора. Она включает короткозамыкатель *КЗ* (рис. 16-43, б), который устраивает однофазное или двухфазное к. з. на линии. Защиты линии *РЗА* и *РЗВ* приходят в действие, отключают выключатели *В_A* и *В_B* и пускают АПВ.

В бестоковую паузу (когда на линии нет напряжения и тока) отделитель *ОД* отключает трансформатор. После этого АПВ включает линию и связь между подстанциями *A* и *B* восстанавливается.

Таким образом, несмотря на отсутствие выключателя на трансформаторе, повреждение в нем отключается селективно.

Трансформаторы тока. На подстанциях, подключенных по упрощенным схемам, для выполнения защиты трансформатора должны обязательно использоваться встроенные или «накладные» трансформаторы тока *T*.

Встроенные трансформаторы тока устанавливаются внутри кожуха на высоковольтных вводах трансформатора 110 кВ и выше.

Накладные трансформаторы разработаны в Челябинэнерго [Л. 74] и выпускаются промышленностью для трансформаторов 35—330 кВ. Их сердечник надевается на выводы силового трансформатора снаружи. При наличии встроенных или накладных трансформаторов тока со стороны высшего напряжения силового трансформатора на них включается дифференциальная или максимальная защита, которая охватывает весь трансформатор и оши-

новку низшего напряжения. При отсутствии трансформаторов тока со стороны высшего напряжения на силовом трансформаторе может быть выполнена только максимальная защита со стороны низшего напряжения. При этом вводы низшего напряжения силового трансформатора и ошиновка до трансформаторов тока остаются без защиты. Поэтому применение встроенных или накладных трансформаторов тока со стороны высшего напряжения является обязательным.

Оперативный ток. Подстанции, выполняемые по упрощенной схеме, не имеют «тяжелых» выключателей, требующих приводов с большим потреблением мощности. В связи с этим на таких подстанциях удобно применять переменный оперативный ток.

б) Выполнение защиты

Релейная защита трансформаторов на подстанциях с упрощенной схемой имеет несколько вариантов исполнения в зависимости от схемы включения трансформаторов, их мощности и чувствительности линейной защиты.

Защита трансформаторов, включенных по блочной схеме (рис. 16-42, б). Для защиты маломощных трансформаторов целесообразно использовать линейную защиту, установленную с питающего конца линии на подстанции А. Эта защита, как правило, выполняется из двух комплектов: максимальной защиты с выдержкой времени по условиям селективности и мгновенной токовой отсечкой, отстроенной от к. з. за трансформатором. Отсечка охватывает часть обмотки трансформатора, вторая часть — входит в зону максимальной защиты, которая действует также и на участке от выводов до выключателя на стороне низшего напряжения трансформатора и резервирует к. з. на шинах низшего напряжения.

На трансформаторе устанавливается максимальная защита со стороны низшего напряжения, действующая на отключение выключателя B_C . Газовая защита трансформаторов (если она имеется) действует на сигнал. Для защиты от перегрузки устанавливается сигнальное токовое реле в одной фазе.

На мощных трансформаторах, для которых требуется быстродействующая защита, полностью охватывающая обмотки и выводы трансформатора, а также защита от витковых повреждений, применяются дифференциальная и газовая защиты.

Обе защиты действуют на включение короткозамыкателя. Защита линии выполняется как и в предыдущем случае.

Защита трансформаторов, подключаемых к ответвлению от линий (рис. 16-42, а). На трансформаторе устанавливается короткозамыкатель и отделитель.

Для обеспечения селективного отключения повреждений в трансформаторе на нем должна быть предусмотрена полноценная защита

от повреждений, действующая на короткозамыкатель и отделитель, а на линии — АПВ (рис. 16-43, б).

В качестве защиты от повреждений в трансформаторе устанавливаются газовая и дифференциальная защиты. На трансформаторах средней и малой мощности вместо дифференциальной защиты применяется токовая отсечка в сочетании с максимальной защитой или защита от замыканий на корпус. Со стороны высшего напряжения защиты включаются на встроженные или накладные трансформаторы тока. При этом наружная часть выводов силового трансформатора попадает в зону трансформаторной защиты только при применении защиты от замыканий на корпус (§ 16-11).

Для защиты трансформатора от внешних к. з. устанавливается максимальная защита. Она подключается к трансформаторам тока на стороне низшего напряжения и действует на отключение выключателя трансформатора B_T .

Функции резервной защиты трансформатора (на случай отказа короткозамыкателя, выключателя B_T или защиты трансформатора) возлагаются на линейную защиту.

На рис. 16-43, а приведена защита трансформатора с передачей отключающих импульсов на противоположные концы линии. При повреждении в трансформаторе защита его передает по каналу связи импульс на отключение выключателей B_A и B_B линии.

В обеих схемах после отключения выключателей линии специальным устройством проверяется отсутствие напряжения на поврежденном трансформаторе и автоматически отключается отделитель ОД. По истечении времени, необходимого для этой операции действует АПВ, включая в работу линию Л1.

Двухтрансформаторные подстанции. Трансформаторы на этих подстанциях работают раздельно (рис. 16-42, в). Для обеспечения надежности приемные шины выполняются в виде двух секций; связывающий их секционный выключатель нормально отключен и имеет АВР. При этих условиях защита трансформаторов и питающих их линий выполняется аналогично рассмотренной по рис. 16-43, б.

Схема действия защиты на короткозамыкатель и отделитель. Эта схема является важной частью защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения.

Как уже отмечалось, действие защиты на короткозамыкатель и отделитель должно происходить в определенной последовательности, обеспечивающей работу отделителя в бестоковую паузу АПВ линии, т. е. в тот момент, когда по отделителю не проходит ток. *Схема управления отделителем выполняется таким образом, чтобы импульс на его отключение подавался после срабатывания короткозамыкателя при условии, что питающая линия отключилась и ток к. з. прекратился.* На рис. 16-44 показана схема, удовлетворяющая поставленным условиям. Защита трансформатора при срабатывании подает импульс в катушку включения КВ привода короткозамыкателя.

Импульс на отключение отделителя (в катушку KO) подается контактами реле времени PB . Реле PB пускается при замыкании блок-контактов BK короткозамыкателя и контактов токового реле PT . Первые (контакты BK) замыкаются при замыкании ножа короткозамыкателя, а вторые (контакты PT) — при отсутствии тока в реле PT .

Таким образом, отключение отделителя может произойти только при срабатывании короткозамыкателя и отключении линии.

Однако если блок-контакты BK замкнутся раньше, чем срабатывает нож короткозамыкателя, то, поскольку контакты PT при этом будут еще замкнуты, возможна подача импульса на отключение

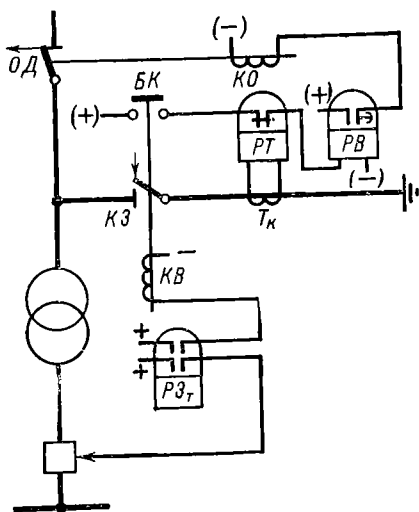


Рис. 16-44. Схема отключения отделителя.

отделителя до отключения линий. Для предотвращения такой опасности служит реле времени PB . Оно должно работать с выдержкой времени порядка 0,2—0,3 с, превосходящей возможную одновременность замыкания ножа и блок-контактов короткозамыкателя.

Чтобы обеспечить срабатывание отделителя во время бестоковой паузы, когда питающая линия отключена и подстанция остается без напряжения, оперативная цепь отделителя должна питаться от независимого источника. Таким источником может служить аккумуляторная батарея или предварительно заряженный конденсатор.

Рассмотренная схема (рис. 16-44) является универсальной и может применяться при наличии на линии как быстродействующей защиты, так и защиты с выдержкой времени. В обоих случаях на линии применяется однократное АПВ, при этом время АПВ должно быть больше времени включения короткозамыкателя и отключения отделителя, чтобы за время бестоковой паузы поврежденный трансформатор успел отключиться.

Полная схема защиты на переменном оперативном токе понижающего трансформатора, подключенного к ответвлению от линий, приведена на рис. 16-45. На трансформаторе установлены дифференциальная, газовая, максимальная токовая защиты и защита от перегрузки, действующая на сигнал (рис. 16-45, а). Оперативные цепи дифференциальной и максимальной защиты питаются от трансформаторов тока, газовой защиты и защиты от перегрузки — от трансформаторов собственных нужд.

Дифференциальная защита выполнена с помощью реле типа РНТ-565 (8РТН и 9РТН).

Для питания защиты со стороны высшего напряжения используются встроенные в силовой трансформатор трансформаторы тока *4ТТ*. Вследствие относительно малой мощности встроенных трансформаторов тока их вторичные обмотки соединяются на каждой фазе последовательно. Дифференциальная защита действует на включение короткозамыкателя *2КЗ* и отключение выключателя *3В*.

При срабатывании дифференциальной защиты контакты *8РТН* и *9РТН* (рис. 16-45, б) замыкают цепь токовых промежуточных реле *17РП* и *18РП* типа РП-341 (см. § 4-8, а); последние приходят в действие и дешунтируют катушки включения короткозамыкателя *37КВ* и *38КВ* и отключения выключателя *39КО* и *40КО*. В результате этого включается короткозамыкатель *2КЗ* и отключается выключатель *3В*.

Максимальная защита (рис. 16-45, б) выполнена с помощью токовых реле *11РТ* и *12РТ* типа РТ-40, токового реле времени *15РВ* типа РВМ (см. § 4-8, а). Токовые реле максимальной защиты *11РТ* и *12РТ* включены на трансформаторы тока *4ТТ* со стороны высшего напряжения (в плечо дифференциальной защиты), что позволяет ввести в зону действия максимальной защиты силовой трансформатор. Поскольку трансформаторы *4ТТ* соединены в треугольник, максимальная защита не реагирует на ток I_0 (см. § 3-6, а), благодаря этому исключается возможность ее неселективной работы при к.з. на землю в сети высшего напряжения в тех случаях, когда нейтраль защищаемого трансформатора заземлена.

Максимальная токовая защита выполняется с двумя выдержками времени. С меньшей выдержкой она отключает к.з. на шинах низшего напряжения и резервирует отказы защит отходящих от них присоединений. С большей выдержкой она работает при к.з. в трансформаторе, резервируя его дифференциальную защиту. При срабатывании токового реле *11РТ* или *12РТ* замыкается цепь обмотки реле времени *15РВ*. Последнее первым скользящим контактом *15РВ₁* подает ток в обмотку токового промежуточного реле *19РП*. Это реле срабатывает и дешунтирует катушку отключения *41КО* выключателя *3В*, после чего он отключается. Второй контакт *15РВ₂* замыкается с большей выдержкой времени; он приводит в действие промежуточные реле *17РП* и *18РП*, которые включают короткозамыкатель *2КЗ*. Г а з о в а я з а щ и т а дополняет дифференциальную защиту и должна работать прежде всего при повреждениях, сопровождающихся малыми токами, при которых дифференциальная защита не может сработать из-за недостаточной чувствительности и малой величины оперативного тока, получаемого от трансформаторов тока. В этом случае напряжение остается близким к нормальному, поэтому оперативные цепи газовой защиты питаются от трансформатора собственных нужд *Тс.н* (рис. 16-45, в). Отключающий контакт газового реле *14РГ₁* действует на промежуточное реле *16РП*, которое с помощью контакта *16РП₁* удерживает себя в сработанном состоянии до отключения короткозамыкателя, после чего размыкается его блок-контакт *2КЗ*. Второй и третий контакты реле *16РП* замыкают цепь катушек *42КВ* и *43КО*, с помощью которых включается короткозамыкатель и отключается *3В*. Второй контакт газовой защиты *РГ₂* действует на сигнал.

Оперативная цепь отключения отделителя питается от предварительно заряженных конденсаторов *С₁*, *С₂*, *С₃* (рис. 16-45, в), чем обеспечивается отключение отделителя во время бестоковой паузы, когда на подстанции отсутствует напряжение. Заряд конденсаторов *С* осуществляется от зарядного устройства УЗ-400 (см. § 4-8, в), которое питается от трансформатора собственных нужд *Тс.н*. Схема отключения отделителя выполнена согласно рис. 16-44, б. При включении короткозамыкателя *2КЗ* и отсутствии в нем тока блок-контакт *2КЗ* и контакт токового реле *13РТ* замыкают цепь промежуточного реле замедленного действия *20РПВ*, последнее с небольшой выдержкой времени 0,2 с замыкает цепь катушки отключения отделителя *44КО*.

Сигнал о перегрузке подается токовым реле *10РТ*, оперативная цепь которого питается от трансформатора собственных нужд.

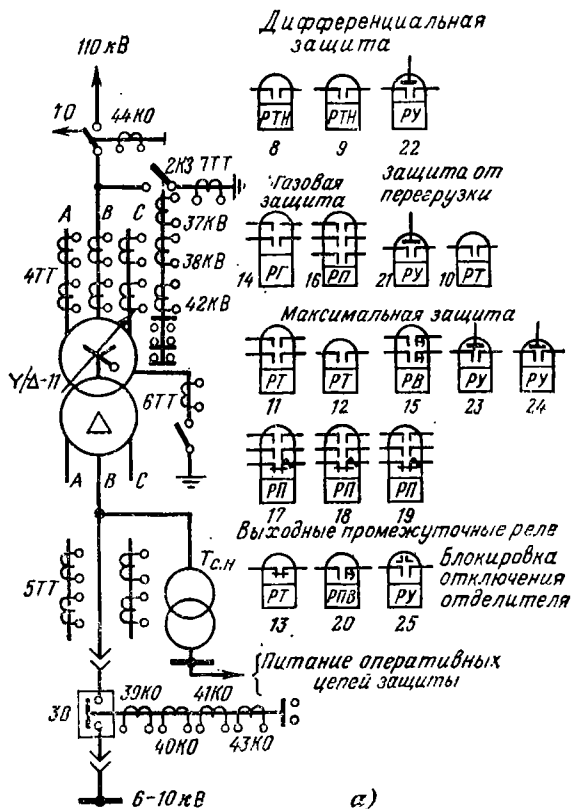


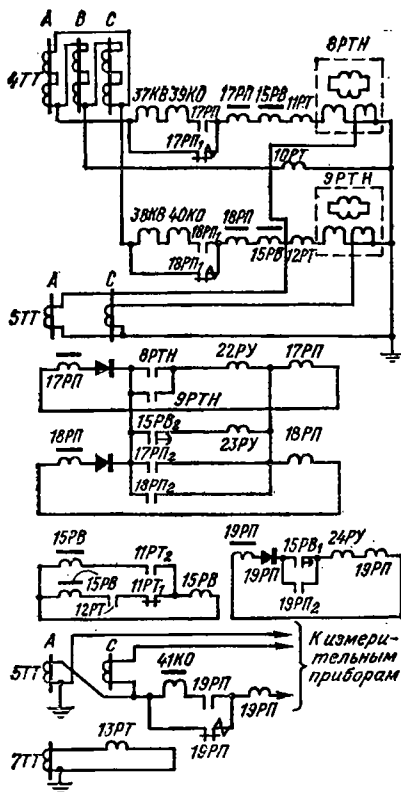
Рис. 16-45. Полная принципиальная схема защиты ключателя на стороне 110 кВ.

Рассмотренная схема защиты предназначена для трансформаторов мощностью 7,5—20 МВ·А. На более мощных трансформаторах защита выполняется так же, но для большей надежности дифференциальная защита выполняется трехфазной. Другие варианты схем понижительных трансформаторов подробно рассмотрены в [Л.5, 62, 80].

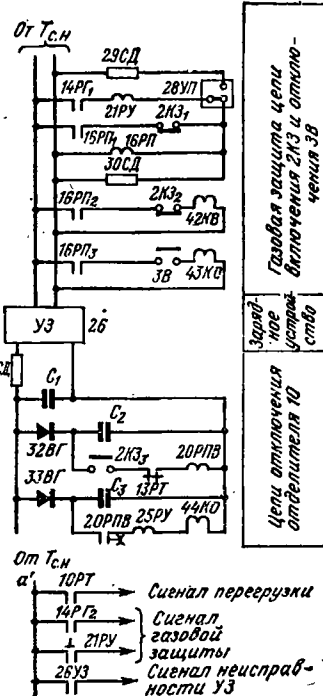
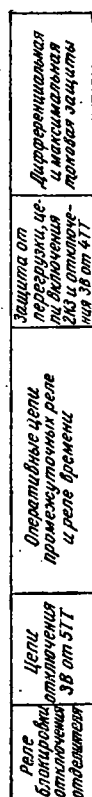
16-13. ЗАЩИТА ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫХ РЕГУЛИРОВОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

в) Виды защит

Для регулирования напряжения под нагрузкой в ряде случаев применяются специальные вольтодобавочные трансформаторы, состоящие из регулировочного автотрансформатора и последова-



6)



7)

трансформатора, подключенного к ответвлению от линии 110 кВ без вы-

тельного трансформатора (рис. 16-46). Вторичная э. д. с. ΔE с регулировочного автотрансформатора при помощи последовательного трансформатора добавляется к э. д. с. E одной из обмоток основного трансформатора, увеличивая или уменьшая ее величину на

$$\Delta U\% = \frac{\Delta E}{E} 100\%.$$

Для защиты вольтодобавочного трансформатора устанавливаются газовая защита и выполняемая по особой схеме максимальная токовая защита. Кроме того, может использоваться дифференциальная защита основного трансформатора или устанавливается дополнительно дифференциальная защита вольтодобавочного трансформатора.

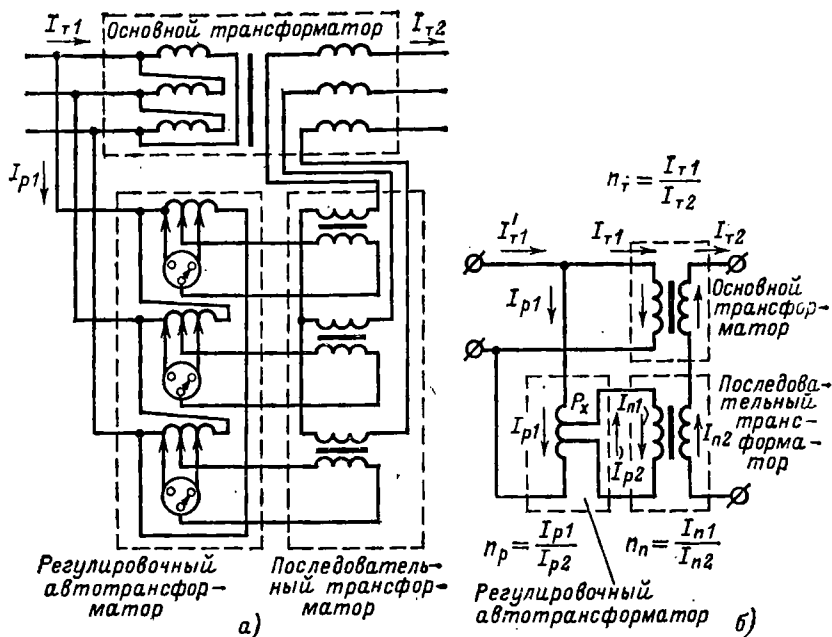
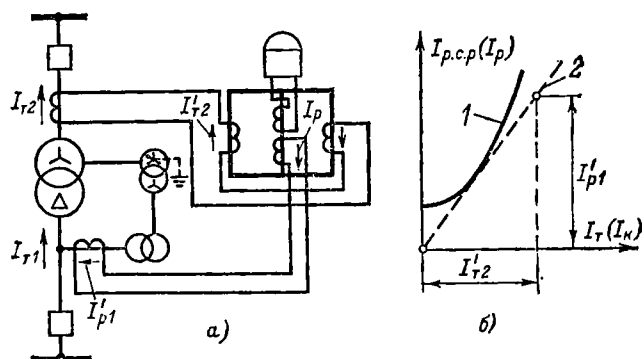


Рис. 16-46. Схема включения добавочного регулировочного трансформатора. а — полная схема; б — схема одной фазы.



6) Максимальная токовая защита вольтодобавочного трансформатора

Для защиты от к. з. в регулировочном автотрансформаторе и соединительной проводке между автотрансформатором и последовательным трансформатором предусматривается максимальная токовая защита, имеющая два варианта исполнения. Для уменьшения выдержки времени зона действия этой защиты ограничивается так, чтобы она не работала при к. з. в сети основного трансформатора. В первом варианте исполнения для этой цели служит блокировка, а во втором — торможение. В современных схемах применяется защита с торможением.

Максимальная токовая защита с торможением (рис. 16-47) выполняется при помощи реле с магнитным торможением такой же конструкции, как и реле, показанное на рис. 16-35. Рабочая обмотка этого реле включается со стороны первичных выводов автотрансформатора, а тормозная — в цепь обмотки силового трансформатора (рис. 16-47).

Поток тормозной обмотки замыкается по крайним стержням магнитопровода, вспомогательного трансформатора, не попадая в средний стержень, где расположена вторичная обмотка, питающая реле. Таким образом, тормозной поток только подмагничивает магнитопровод, ухудшая при больших токах I_T трансформацию рабочего тока I_P в цепь реле. При к. з. в автотрансформаторе подмагничивающее действие тормозной обмотки невелико, так как ток I_T относительно мал, поэтому рабочая обмотка индуцирует во вторичной обмотке ток, достаточный для действия реле. При внешних к. з. ток в тормозной обмотке возрастает, вызывая насыщение магнитопровода, трансформация рабочего тока ухудшается и реле не действует.

Наклон тормозной характеристики реле выбирается по соотношению токов в рабочей и тормозной обмотках при внешних к. з. Это соотношение имеет постоянное значение и определяется из уравнения, связывающего первичный ток автотрансформатора I_P с током вторичной обмотки силового трансформатора I_{T2} : $I_{P1} = I_{T2} \mu_P \mu_P$ (рис. 16-46, б).

На броски намагничивающего тока, появляющегося при включении трансформатора, защита не реагирует вследствие насыщения магнитопровода, как и в обычном БНТ.

в) Дифференциальная защита

Для защиты вольтодобавочного трансформатора может использоваться дифференциальная защита основного трансформатора или может устанавливаться самостоятельная дифференциальная защита. Дифференциальная защита, охватывающая основной и вольтодобавочный трансформаторы, показана на рис. 16-48. Для надежной отстройки от токов небаланса при регулировании напряжения применяются дифференциальные реле с торможением (см. § 16-5, г).

На рис. 16-49 показана самостоятельная дифференциальная защита последовательного трансформатора.

Включить в зону действия этой защиты весь вольтодобавочный трансформатор не удастся, так как при пулевом положении подвижного контакта P_X регулировочного автотрансформатора (рис. 16-46, б) ток I_{P1} в автотрансформаторе и питающемся от него плече защиты отсутствует, в то время как во втором плече будет протекать ток силового трансформатора I_{T2} , в результате чего возможна неселективная работа защиты.

Для отстройки от намагничивающих токов и токов небаланса применяется дифференциальное реле с БНТ.

В зону рассматриваемой защиты входят выводы и обмотки последовательного трансформатора и обмотка звезды основного трансформатора. При

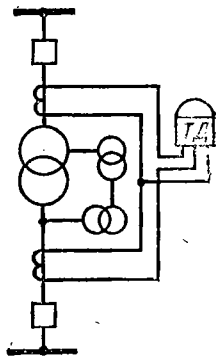


Рис. 16-48. Дифференциальная защита, охватывающая основной и регулировочный трансформаторы.

наличии дифференциальной защиты последовательного трансформатора и токовой защиты вольтодобавочного трансформатора дифференциальная защита основного трансформатора может выполняться по схеме на рис. 16-49. В этом

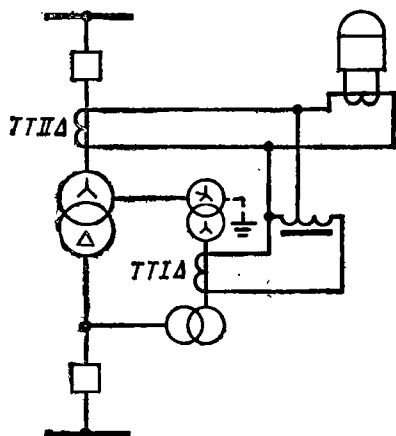


Рис. 16-49. Дифференциальная защита последовательного трансформатора.

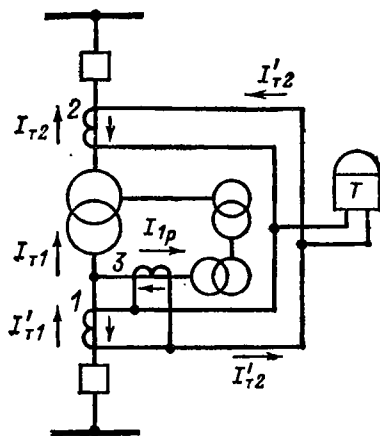


Рис. 16-50. Дифференциальная защита, охватывающая только основной трансформатор.

случае защита не реагирует на повреждение в вольтодобавочном трансформаторе, но при такой схеме соотношение токов в ее плечах не зависит от коэффициента трансформации регулировочного автотрансформатора.

ГЛАВА СЕМНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА БЛОКОВ ГЕНЕРАТОР—ТРАНСФОРМАТОР И ГЕНЕРАТОР—ТРАНСФОРМАТОР—ЛИНИЯ

17-1. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ БЛОКОВ

Блочные схемы соединений находят широкое применение на современных мощных электростанциях. Наиболее часто соединяются в один блок генератор — повысительный трансформатор (или автотрансформатор) и трансформатор собственных нужд (рис. 17-1). Находят применение также блоки генератор — повысительный трансформатор (или автотрансформатор) — линии. Блоки большой мощности (150, 200, 300, 500, 800 МВт) объединяют в единый агрегат не только генератор и трансформатор, но также котел и турбину. Такие блоки не имеют поперечных связей, позволяющих заменить один элемент блока (например, трансформатор или котел) аналогичным элементом другого блока. В результате этого повреждение или нарушение нормальной работы одного элемента блока выводит из работы весь блок.

На генераторах, трансформаторах (или автотрансформаторах) и линиях, соединенных в один блок, устанавливаются те же защиты,

что и в случае их раздельной работы. Однако объединение в один рабочий агрегат нескольких элементов большой мощности вызывает некоторые, отмеченные ниже особенности в требованиях к защитах и в отдельных случаях в исполнении защиты.

1. Соединение в один блок нескольких элементов позволяет объединить однотипные защиты этих элементов в одну общую защиту. Общими обычно выполняются дифференциальные защиты генератора и трансформатора, а также защиты от сверхтоков при внешних к. з. и перегрузках.

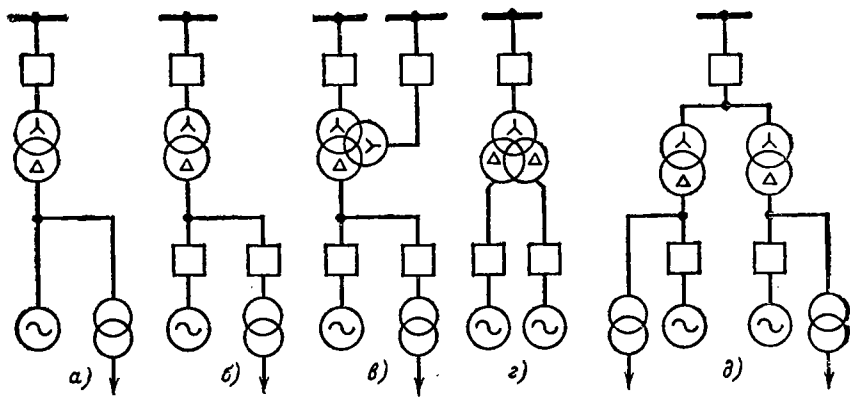


Рис. 17-1. Основные схемы блоков.

а, б, в — генератор — трансформатор с ответвлением на с. н.; г — блок с двумя генераторами; д — спаренные блоки.

2. Отсутствие электрической связи между генератором и сетью, имеющее место в блочных схемах, облегчает решение вопросов селективности защиты генератора от замыканий на землю, но требует в то же время новых способов выполнения этой защиты.

3. Вследствие высокой стоимости мощных генераторов и трансформаторов блока к их защитах от внутренних повреждений предъявляются повышенные требования в части чувствительности, скорости действия и надежности.

4. Малые запасы по нагреву мощных генераторов обуславливают необходимость выполнения защиты от недопустимого нагрева ротора генератора при несимметричном режиме и от перегрузки обмотки ротора.

5. На блоках без поперечных связей, все элементы которых объединены в единый агрегат, возникает необходимость действия электрических защит не только на выключатель и АПВ, но и на останова блока в целом, т. е. котла и турбины.

Ниже рассмотрены особенности выполнения защит блоков.

а) Защита от сверхтоков при внешних к.з. и перегрузках и защита от несимметричных режимов

Виды защит от сверхтоков и несимметричных режимов, применяемые на блоках, зависят от мощности блоков.

На блоках малой мощности до 30 МВт включительно генераторы выполняются заводами с косвенной системой охлаждения. Эти генераторы допускают по условиям нагрева значительные перегрузки, в том числе и в несимметричном режиме. В связи с этим на генераторах с косвенным охлаждением перегрузки (симметричные и несимметричные) могут ликвидироваться персоналом. Специальных защит с действием на отключение при симметричных и несимметричных перегрузках на этих генераторах руководящими указаниями по релейной защите [Л. 6] не предусматривается. Поэтому на маломощных блоках защита от перегрузки выполняется с действием на сигнал. В качестве защиты от внешних к. з. применяется токовая максимальная защита с комбинированным пуском по напряжению (§ 15-5, б и 16-2, е). Эта защита отличается простотой исполнения и малой стоимостью.

На блоках средней и большой мощности с генераторами, имеющими непосредственное охлаждение, устанавливаются три вида защит от перегрузок и внешних к. з.:

1. Защита от несимметричных перегрузок и внешних к. з. выполняется с помощью реле типа РТФ-6М с интегрально зависимой характеристикой выдержки времени (см. § 15-5, г). Принципы выполнения этого реле и его блок-схемы были рассмотрены в § 15-5, г; на рис. 17-2, а приведена упрощенная принципиальная схема защиты обратной последовательности, выполненной с помощью реле РТФ-6. Реле РТФ-6, как уже было указано, состоит из четырех элементов: сигнального элемента $T1$, элемента с интегрально зависимой характеристикой $t_1 = A/I_{2*}^3$ (реле $T2$) и двух отсеков I и II с независимой характеристикой (реле $T3$ и $T4$). Все элементы реагируют на ток I_2 , получаемый от фильтра обратной последовательности Φ_2 . Интегрально зависимый элемент работает при несимметричных перегрузках и внешних к. з. и действует с временем t_1 на отключение выключателей блока, а затем, если несимметрия не исчезнет, с временем t_2 на отключение и останова блока в целом. Выдержка времени $t_2 = t_1 + \Delta t$, ступень времени Δt обеспечивается с помощью реле времени $B2$. Отсечка I предназначена для работы при несимметричных к. з. в сети высшего напряжения и действует на отключение выключателя блока. Отсечка II служит для быстрого и селективного отключения несимметричных к. з. в генераторе и токопроводе, соединяющем его с трансформатором, в случае отказа дифференциальной защиты генератора. Отсечка II используется только на блоках, имеющих выключатель в цепи генератора; она действует на отключение генератора и его

АГП. Зона действия отсечки ограничивается с помощью блокирующего реле напряжения H_0 , включенного на $3U_0$. При двухфазных к. з. на стороне генератора работают реле $T4$ и H_0 и защита действует на отключение. При к. з. за трансформатором блока (на стороне генераторного напряжения $U_0 = 0$) реле H_0 не действует, не позволяя, таким образом, работать отсечке.

Такое ограничение зоны действия отсечки ($T4$) позволяет не согласовывать ее выдержку времени с защитами остальной сети. Выдержка времени отсечки II принимается равной $0,4-0,5$ с — на ступень больше дифференциальной защиты генератора. Ток

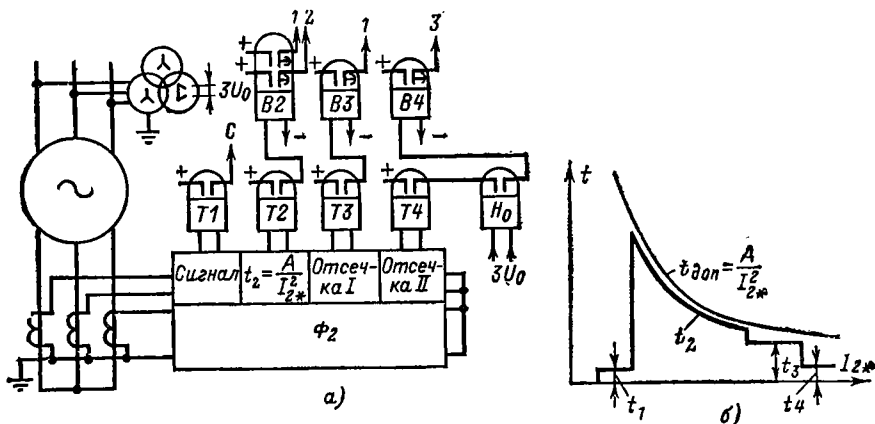


Рис. 17-2. Схема защиты от несимметричных нагрузок и внешних к. з. (а) и характеристика времени действия защиты (б).

Цепь 1 — на отключение выключателя блока; цепь 2 — на отключение блока, АГП и останов котла и турбины; цепь 3 — на отключение генератора, АГП, останов котла и турбины.

срабатывания отсечки выбирается из условий надежности действия при минимальном значении тока $I_{2\min}$ при двухфазном к. з. на выводах генератора:

$$I_{с.р} = \frac{I_{2\min}}{k_q} \leq \frac{I_{2\min}}{2},$$

где k_q — коэффициент чувствительности, равный 2.

Напряжение срабатывания блокирующего реле H_0 принимается равным $35-40$ В из условия отстройки от напряжения небаланса

$$U_{с.р} > U_{нб}.$$

Характеристика срабатывания интегрально-зависимого элемента задается заводом для мощных генераторов $150-200-300$ МВт, исходя из уравнения

$$t_{доп} = \frac{A}{I_{2*}^2}. \quad (17-1)$$

Характеристика регулируется изменением постоянной A . Завод выпускает реле в трех исполнениях с пределами регулирования A :

от 5 до 10, от 10 до 20 и от 20 до 45. Время действия зависимого элемента t_2 должно удовлетворять двум условиям:

1) Характеристика времени действия элемента $t_{\text{защиты}} = f(I_{2*})$ должна идти параллельно характеристике $t_{\text{доп}}$ по уравнению (17-1), но немного ниже с учетом погрешности реле, так чтобы $t_{\text{защиты}}$ не превысило $t_{\text{доп}}$.

2) Время $t_{\text{защиты}}$ должно обеспечивать селективность с защитами отходящих линий.

Интегрально-зависимый элемент имеет токовое пусковое реле. Его ток срабатывания выбирается из условия надежного действия интегрально-зависимого элемента при токе I_2 , соответствующем $t_{\text{доп}} = 600$ с. Этот ток согласно выражению (17-1) $I_{2(600)*} = \frac{8}{\sqrt{600}} = 0,115$.

Отсюда

$$I_{\text{с. р}*} = I_{2(600)*} / k_n,$$

где $k_n = 1,1$.

Уставки отсечки I (реле ТЗ) выбираются из условия ее надежной работы при однофазных и двухфазных к. з. в сети высшего напряжения и согласования по чувствительности с защитами отходящих линий. При выполнении этих условий $I_{\text{с. р}*} \approx 0,4 \div 1$; время действия отсечки t не должно быть больше $t_{\text{доп}} = \frac{A}{I_{\text{с. р}*}}$.

Характеристика реле РТФ-6 приведена на рис. 17-2, б.

2. Для отключения симметричных внешних к. з. предусматривается максимальная защита с пуском по напряжению в однофазном исполнении (§ 15-5 и 16-2, е). От симметричных перегрузок устанавливается сигнальное токовое реле (см. § 15-5, в).

3. Для повышения чувствительности к наиболее частым внешним к. з. — однофазным — устанавливается защита нулевой последовательности, реагирующая на I_0 или U_0 , рассмотренная в § 16-2, г.

На всех блоках генератор и трансформатор (рис. 17-1, а) образуют единый агрегат, поэтому защита от внешних к. з. на стороне низшего напряжения повысительного трансформатора не устанавливается, ее функции выполняет аналогичная защита генератора, которая является в этом случае резервной защитой всего блока. Необходимость защит от внешних к. з. на стороне высшего и среднего напряжения повысительного трансформатора, а также на трансформаторе собственных нужд зависит от схемы блока и расположения выключателей.

На блоках с двухобмоточным повысительным трансформатором (рис. 17-1, а, б) устанавливается только один комплект защиты от внешних к. з. Он включается на трансформаторы тока, расположенные на нулевых выводах генератора. При таком размещении защиты все элементы блока попадают в ее зону, что позволяет

защите от внешних к. з. блока резервировать защиты от внутренних повреждений генератора и трансформатора блока. Защита действует на выключатель блока $B1$ и АГП генератора. На рис. 17-3, а приведена схема размещения и действия защиты от внешних к. з. Последняя условно изображена в виде реле 2 и реле времени 3 и 4. Схема и тип защиты, как было указано выше, зависят от мощности генератора блока. Защита имеет две выдержки времени t_1 и t_2 , согласованные по условию селективности с защитами присоединений, питающихся от шин электростанции. При неотключившемся

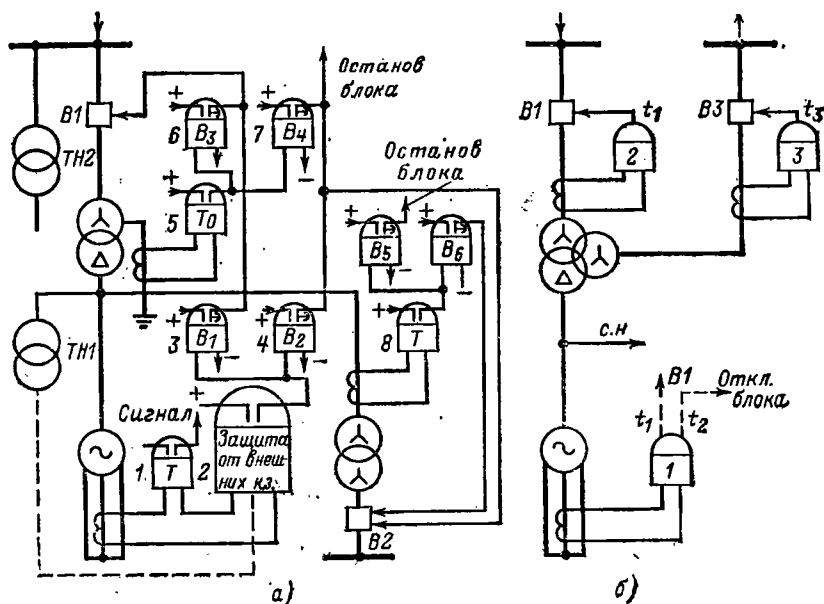


Рис. 17-3. Защита блока от внешних к. з.

а — с двухобмоточным трансформатором; б — с трехобмоточным трансформатором,

к. з. на шинах станции или в сети высшего напряжения защита от внешних к. з. отключает с меньшей выдержкой t_1 (установленной на реле времени 3) выключатель блока $B1$, после чего защита прекращает свое действие, блок остается в работе, питая собственные нужды. Если же к. з. возникло на элементах блока, то при отказе дифференциальной защиты поврежденного элемента резервная защита блока отключает его от сети с выдержкой времени t_1 , а затем с большей выдержкой $t_2 = t_1 + \Delta t$ (реле времени 4) подает сигнал на прекращение питания места к. з. от генератора и остановку блока (отключение $B1$, АГП, останов котла и турбины).

Реле напряжения максимальной защиты с пуском по напряжению обычно питается от трансформатора напряжения $ТН1$, подключенного к выводам генератора. Для повышения чувствитель-

ности к к. з. на стороне высшего напряжения реле напряжения необходимо подключить и к $TN2$ на шинах блока.

От внешних к. з. на землю в сети высшего напряжения устанавливается специальная чувствительная защита, реагирующая на ток или напряжение нулевой последовательности. Эта защита служит дополнением к защите от несимметричных к. з., которая обычно имеет недостаточную чувствительность при однофазных к. з. Защита нулевой последовательности резервирует отключение к. з. на землю на шинах блока и в подключенной к ним сети.

Если обмотка высшего напряжения трансформатора блока заземлена, как показано на рис. 17-3, а, то устанавливается токовая защита нулевой последовательности (реле 5, 6 и 7), действующая с выдержкой времени на отключение выключателя блока $B1$.

Если нейтраль трансформатора не заземлена или трансформатор может работать в режиме заземленной и разземленной нейтрали предусматривается защита, отключающая трансформатор при замыканиях на землю в сети высшего напряжения в случае отказа соответствующих защит поврежденного элемента (шин или линий) с выдержкой времени меньшей, чем на защите других блоков станции, работающих с заземленной нейтралью. Указанная защита выполняется так же, как и на повысительных трансформаторах (§ 16-2, д).

Защита I_0 от внешних к. з. (5) имеет также как и защита 2 две выдержки времени: t_1 и t_2 (рис. 17-3, а). При к. з. на шинах или неотключившемся к. з. в сети высшего напряжения защита блока отключает с меньшей выдержкой времени t_1 выключатель блока $B1$, сохраняя при этом питание собственных нужд блока. Короткие замыкания на элементах блока в случае отказа дифференциальной защиты ликвидируются защитой с выдержкой времени t_2 , при этом отключается весь блок, т. е. АГП, выключатель $B1$, трансформатор с. н., котел и турбина. Если защита блока 2 имеет недостаточную чувствительность к к. з. за трансформатором с. н., то со стороны генераторного напряжения трансформатора с. н. устанавливается максимальная защита 8, надежно действующая при указанных повреждениях.

На блоках с трехобмоточным повысительным трансформатором (рис. 17-1, г и 17-3, б) кроме защиты 1 от внешних к. з. на генераторе устанавливаются дополнительно защиты 2 и 3 на обмотках среднего и высшего напряжения трансформатора для селективного отключения к. з. на шинах и линиях, питающихся от этих обмоток. При наличии питания со всех сторон трансформатора для селективного отключения внешних к. з. защиту одной из обмоток следует выполнять направленной.

В целях упрощения на блоках с трехобмоточными трансформаторами можно не ставить защиту 2 на стороне высшего напряжения, как показано на рис. 17-3, б, используя вместо нее защиту генератора 1, которая в этом случае выполняется с двумя выдержками времени (t_1 и t_2). Чтобы обеспечить селективное действие защит 1

и 3 при внешних к. з. (в сети среднего или высшего напряжения), их выдержки времени должны удовлетворять условию $t_3 < t_1 < t_2$.

На мощных трехобмоточных блоках для повышения чувствительности к внешним двухфазным к. з. на обмотке высшего напряжения иногда устанавливается токовая защита обратной последовательности. При необходимости она выполняется направленной.

На двоянных блоках (рис. 17-1, б) с выключателями на каждом генераторе защита от внешних симметричных и несимметричных к. з. и перегрузок устанавливается на обоих генераторах. На каждом трансформаторе блока предусматривается защита нулевой последовательности от к. з. на землю в сети высшего напряжения. Эти защиты имеют две выдержки времени и действуют с меньшей выдержкой на отключение выключателя блока, а с большей — на отключение своего генератора. Кроме того, на двоянных блоках рекомендуется ставить дополнительную максимальную защиту для резервирования дифференциальной защиты трансформатора в режиме, когда генератор этого трансформатора отключен. В этом режиме резервная защита своего генератора не будет работать, а защита спаренного блока нечувствительна к к. з. на стороне низшего напряжения трансформатора первого блока.

Защита выполняется в виде двухфазной токовой максимальной защиты (реле 1 и 3 на рис. 17-4). Нормально эта защита отключена, так как она может неправильно работать при перегрузках и качаниях. Защита вводится в работу автоматически в режиме, когда один из генераторов блока отключен. Эта операция выполняется с помощью токового реле 2, реагирующего на исчезновение тока в трех фазах генератора.

б) Защита от повышения напряжения

На блоках с гидрогенераторами защита от повышения напряжения выполняется по § 15-6. На блоках с мощными турбогенераторами и трансформаторами появилась необходимость в установке защиты от повышения напряжения. В связи с интенсивным использованием стали магнитных систем на крупных машинах и трансформаторах заводы-изготовители допускают значения магнитной

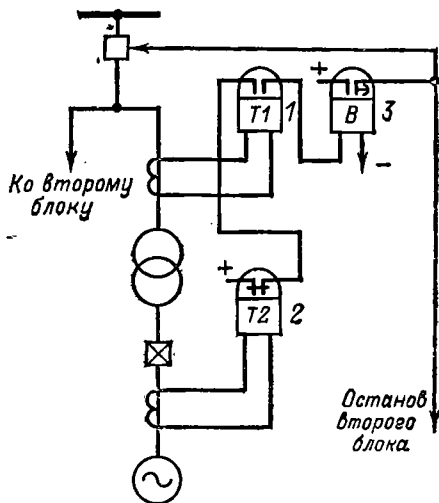


Рис. 17-4. Упрощенная схема дополнительной максимальной защиты трансформатора двоянного блока.

индукции, близкие к началу насыщения стали магнитопроводов. На таких генераторах и трансформаторах повышение напряжения сверх номинального вызывает увеличение магнитной индукции и магнитного потока и как следствие этого повышенный нагрев магнитопроводов трансформаторов и генераторов.

Опасное повышение напряжения возможно в режиме холостого хода блока или при внезапном отключении блока от сети. В первом

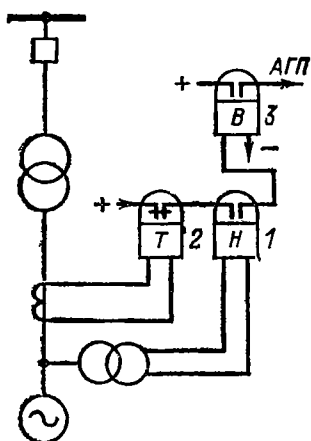


Рис. 17-5. Упрощенная схема защиты от повышения напряжения.

случае повышение напряжения возможно из-за увеличения возбуждения вследствие ошибочных действий персонала или работы регулятора возбуждения, во-втором из-за увеличения оборотов машины, исчезновения тока нагрузки и отказа в работе регулятора возбуждения. Защита выполняется с помощью реле напряжения 1 (рис. 17-5). Опасным повышением напряжения для современных трансформаторов считается его увеличение на 20—30% сверх номинального. Поэтому на защите устанавливается $U_{с.з} = 1,2 U_{ном}$ и $t_з = 3$ с. Но при таких уставках защита может ложно работать от кратковременных повышений напряжения во время качаний и форсировке возбуждения. Учитывая это, защита от повышения напряжения на блоках с

турбогенераторами вводится в работу только в режиме холостого хода и при внезапном отключении блока от сети автоматически с помощью токового реле 2, замыкающего оперативную цепь реле напряжения 1 при исчезновении тока в трех фазах блока одновременно.

В качестве реле напряжения используется реле типа РН-58/200 с $k_{воз} = 0,95$. В качестве блокирующего реле 2 применяется трехфазное токовое реле типа РТ-40/Р. Повышение магнитной индукции B_m возможно не только при увеличении напряжения, но и при резком снижении частоты f , что следует из известного выражения

$$B_m = \frac{U}{4,44wQf}.$$

В связи с этим в зарубежной практике применяется защита, реагирующая на отношение $\dot{U}/f$.

в) Дифференциальная защита на блоках генератор—трансформатор

Дифференциальная защита блока. Для защиты от к. з. в генераторе и трансформаторе блока устанавливается общий комплект дифференциальной защиты, охватывающий генератор и трансформатор, как это показано на рис. 17-6.

На блоках с ответвлением к трансформатору собственных нужд без выключателя (рис. 17-6, а) дифференциальная защита блока выполняется по упрощенной схеме без трансформаторов тока на ответвлении. В этом случае при к. з. в трансформаторе собственных нужд или в питающей от него сети в реле

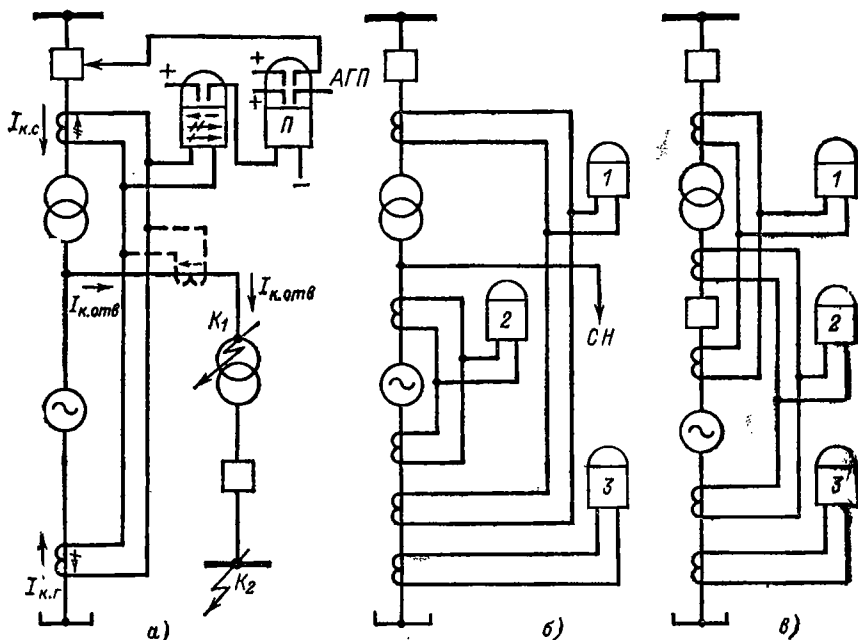


Рис. 17-6. Варианты выполнения дифференциальной защиты блоков.

защиты появляется ток, равный сумме токов, проходящих к месту к. з. от генератора и от системы:

$$I_p = \frac{I_{к.г} + I_{к.с}}{n} = \frac{I_{к.отв}}{n},$$

где $I_{к.отв}$ — полный ток к. з., проходящий по ответвлению, при к. з. в точках K_2 и K_1 .

Под действием этого тока защита может сработать. Чтобы избежать неселективной работы защиты, ее ток срабатывания выбирается больше, чем максимальный ток $I_{к.отв} = I_{к2\max}$ при к. з. за трансформатором собственных нужд (в точке K_2), по выражению

$$I_{с.з} = k_n I_{к2\max}. \quad (17-2)$$

При этом условии дифференциальная защита блока не работает при к. з. за трансформатором собственных нужд. При к. з. в трансформаторе с. н. дифференциальная защита блока приходит в действие, если $I_{к.отв} > I_{с.з}$. Таким образом, трансформатор собственных нужд частично входит в зону дифференциальной защиты блока.

Дополнительно к ней на трансформаторе собственных нужд устанавливаются максимальная и газовая защиты.

Условие (17-2) является *дополнительным*, кроме того дифференциальная защита блока, как и любая дифференциальная защита трансформатора, должна отстраиваться от $I_{нб. макс}$ и от броска намагничивающего тока согласно § 16-8, в.

Дифференциальная защита блоков выполняется с помощью реле типа РНТ-565 или РНТ-566 (с БНТ, но без торможения). Для повышения чувствительности защиты на крупных блоках следует применять дифференциальные реле с торможением типа ДЗТ-11.

Дифференциальная защита генератора. На мощных блоках 150 МВт и больше для повышения чувствительности и надежности защиты генератора помимо дифференциальной защиты блока 1 предусматривается самостоятельная дифференциальная защита генератора 2 (рис. 17-6, б).

Дифференциальная защита блока отстраивается от броска тока намагничивания трансформатора блока и повышенных значений тока небаланса, обусловленных разнотипностью трансформаторов тока и различием сопротивлений плеч. Поэтому ток срабатывания защиты получается больше, чем у дифференциальной защиты генератора, которая отстраивается только от $I_{нб}$, имеющего меньшее значение, чем у защиты блока. Для обеспечения высокой чувствительности дифференциальная защита мощных генераторов выполняется с реле, имеющими торможение (реле типа ДЗТ-5), по схеме приведенной на рис. 15-11.

При наличии дифференциальной защиты генератора дифференциальная защита блока является резервной быстродействующей защитой для генератора. Такое усложнение и дублирование защит генераторов считают оправданными, учитывая большую мощность генератора и обусловленную этим его высокую стоимость.

Как видно из рис. 17-6, б, при установке дифференциальной защиты генератора и блока на нулевых выводах генератора необходимо устанавливать два трансформатора тока. Это вызывается тем, что трансформаторы тока выполняются не больше чем с двумя сердечниками, а с учетом защиты от внешних к. з. 3 для отдельного питания цепей указанных защит нужно иметь три самостоятельных сердечника.

На мощных генераторах 300 МВт и больше размещение двух трансформаторов тока в нуле генератора оказывается довольно трудным по конструктивным причинам. В таких случаях (рис. 17-6, в) в нуле генератора устанавливается один трансформатор тока, от обмоток которого питаются дифференциальная защита генератора 2 и защита от внешних к. з. 3. В место защиты блока устанавливается защита трансформатора 1.

На блоках, выполненных по схеме на рис. 17-1, г и д, каждый генератор должен иметь самостоятельную дифференциальную

защиту по условию селективности. Для трансформатора устанавливается отдельная дифференциальная защита.

Дифференциальная защита повысительного трансформатора. В схемах блоков, имеющих на генераторе выключатель (рис. 17-1, б, в) на повысительном трансформаторе устанавливается самостоятельная дифференциальная защита. Дифференциальная защита блока в этом случае не ставится. Для улучшения отстройки от токов небаланса на трехобмоточных трансформаторах или на трансформаторах с двумя выключателями на стороне высшего напряжения применяются (если это нужно) дифференциальные реле с торможением.

в) Защита от повреждения вводов 500 и 750 кВ трансформаторов

Повреждение вводов 500 кВ является тяжелой аварией трансформатора. Очень часто повреждение изоляции ввода сопровождается его взрывом, в результате которого возникает пожар трансформатора, причиняющий большие разрушения. Ремонт или замена трансформаторов 500 кВ и особенно 750 кВ, отличающихся большой мощностью (240—800 мВ·А), обходится очень дорого и требует значительного времени. Поэтому для трансформаторов 500—750 кВ целесообразно применять защиту, реагирующую на повреждение изоляции вводов, позволяющую обнаружить повреждение изоляции в начальной стадии и предотвратить таким образом тяжелую аварию.

З а щ и т а о с н о в а н а на использовании конструктивных особенностей бумажно-масляных вводов. Бумажно-масляный ввод (рис. 17-7, а) состоит из концентрических слоев пропитанной маслом бумажной изоляции 1, охватывающей токоведущий стержень 2. Для равномерного распределения напряженности электрического поля внутри ввода через определенное количество слоев изолирующей бумаги закладываются листы алюминиевой фольги 3. При такой конструкции каждые два соседних листа фольги с изоляцией между ними образуют конденсатор с емкостью C , а ввод в целом представляет систему последовательно включенных емкостей C между токоведущим стержнем 2 и фланцем 4. Такой ввод обладает результирующей емкостью $C_{\text{в}}$. Емкостный ток ввода, возникающий под действием приложенного к вводу фазного напряжения $U_{\text{ф}}$, равен:

$$I_C = \frac{U_{\text{ф}}}{x_{C\text{в}}}, \quad \text{где} \quad x_{C\text{в}} = \frac{1}{\omega C_{\text{в}}}.$$

При повреждении изоляции ввода часть емкостей C шунтируется и емкостный ток I_C возрастает. Таким образом, *увеличение тока I_C является признаком повреждения изоляции ввода.*

Схема защиты ввода показана на рис. 17-7, б. Принцип действия защиты основан на измерении абсолютного значения геометрической суммы емкостных токов вводов трех фаз трансформатора.

тора: $I_{C(A)} + I_{C(B)} + I_{C(C)}$. Для этого наружные обкладки K вводов трех фаз соединяются в звезду и общая точка звезды с помощью нулевого провода OO' соединяется с землей. В нулевой провод включается трансформатор тока $T1$. Во вторичную цепь $T1$ включаются последовательно три реагирующих органа защиты: чувствительное реле $P1$, действующее на сигнал; более грубое реле $P2$, действующее на отключение, и миллиамперметр mA для измерения тока I_p . Реле $P1$ и $P2$ действуют с выдержкой времени, создаваемой реле времени $B1$ и $B2$. Для обеспечения термической устойчивости реле $P2$ и миллиамперметр mA включаются на ток I_p через вспомогательный насыщающийся трансформатор $T2$.

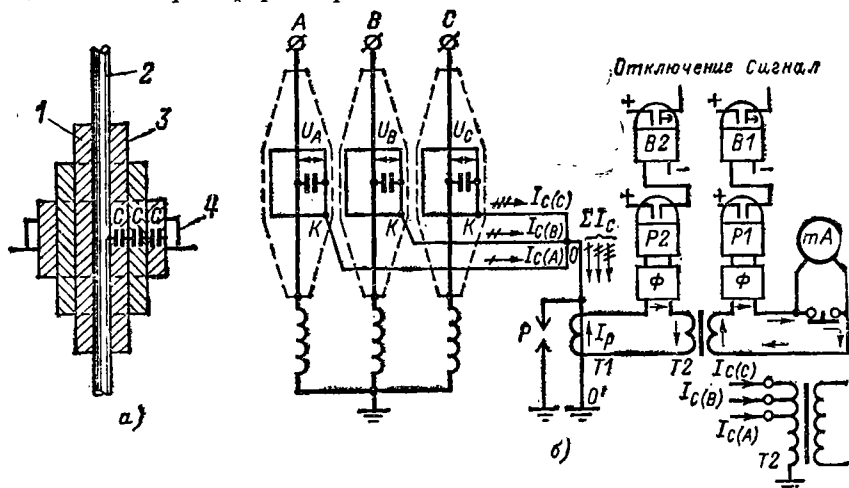


Рис. 17-7. Схема замещения бумажно-масляного ввода (а) и схема защиты вводов 500 кВ типа КИВ-500Р (б).

В нормальном режиме емкостные токи всех фаз равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° , если емкости вводов одинаковы, а приложенные к ним напряжения U_A , U_B и U_C равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° . При этих условиях ток в реле $P1$ и $P2$ $I_p = 0$. Однако в действительности фазные напряжения имеют небольшую асимметрию, емкости вводов не точно одинаковы, а кривая фазных напряжений содержит гармоники, поэтому сумма емкостных токов трех фаз отличается от нуля. В нулевом проводе в нормальном режиме проходит ток небаланса $I_{нб(н.р)}$, состоящий из двух слагающих: $I'_{нб}$, обусловленного неравенством напряжений и емкостей вводов, и $I''_{нб}$, вызванного третьими и кратными им гармониками:

$$I_{нб(н.р)} = I'_{нб} + I''_{нб}.$$

Для уменьшения $I'_{нб}$ в первичной обмотке $T1$ предусмотрены ответвления. Подсоединяя провода фаз к разным ответвлениям,

можно уравнивать н. с., создаваемые током I_C каждой фазы, и свести к нулю или уменьшить $I'_{нб}$.

Для уменьшения $I'_{нб}$ реле включает через фильтры Φ , пропускающие первую гармонику с частотой 50 Гц и ограничивающие прохождение в реле токов высших гармоник.

При несимметричном к. з. во внешней сети фазные напряжения искажаются по величине и фазе, соответственно нарушаются симметрия и равенство емкостных токов вводов трансформаторов. В результате этого во время к. з. в сети в реле появляется ток небаланса:

$$I_p = \sum I_C \neq 0 = I_{нб(к)}.$$

При металлическом двухфазном к. з. на землю (например, фаз B и C) вблизи трансформатора небаланс достигает максимума:

$$I_{нб(к)} = I_{C(A)}, \quad (17-3)$$

так как при этом напряжения поврежденных фаз U_B и $U_C = 0$.

Для исключения ложной работы защиты под действием токов небаланса необходимо выполнить условия

$$I_{с.р} > I_{нб(н.р)} \quad \text{и} \quad I_{с.р} > I_{нб(к)}.$$

При повреждении изоляции одного ввода баланс токов нарушается: $\dot{I}_{C(A)} + \dot{I}_{C(B)} + \dot{I}_{C(C)} \neq 0$, в реле появляется остаточный ток — ток повреждения: $I_p = \sum I_C = I_{пов}$. Реле приходит в действие, если $I_{пов} > I_{с.р}$. С помощью миллиамперметра mA осуществляется периодический контроль за током в нулевом проводе (в реле). Увеличение тока I_p указывает на появление повреждения во вводе или на нарушение токовых цепей защиты, последнее может привести к ложной работе защиты.

Выбор уставок. Ток срабатывания сигнального реле $P1$ должен быть отстроен от небаланса в нормальном режиме:

$$I_{с.р} = k_n I_{нб(н.р)},$$

где k_n — коэффициент надежности, равный 2.

По опыту эксплуатации $I_{нб(н.р)} \approx 3 \div 5$ мА. Для исключения ложной работы $P1$ при к. з. в сети под действием $I_{нб(к)}$ вводится выдержка времени $t_{p1} > t_k$, здесь t_k — максимальное время отключения к. з. в сети.

Ток срабатывания отключающего реле $P2$ должен быть больше тока небаланса при к. з. в сети. С учетом (17-3)

$$I_{с.р} = k_n I_{нб(к)} = k_n \frac{I_{C(\Phi)}}{n_{T1}},$$

где n_{T1} — коэффициент трансформации $T1$, $n_{T1} = \frac{1}{10}$. Для вводов современной конструкции $I_{C(\Phi)} \approx 1$ А. Выдержка времени выбирается минимальной $t_{p2} = 0,5$ с для отстройки от бросков зарядного тока во вводах. Защита на рассмотренном принципе типа

КИВ-500Р выпускается Чебоксарским электроаппаратным заводом. В качестве реле $P1$ и $P2$ в вышеуказанной защите применяются реле типа РТ-40/Ф. Ведется разработка более чувствительной защиты на полупроводниках элементах.

г) Защита генераторов блоков от замыканий на землю

Токи и напряжения нулевой последовательности, появляющиеся на генераторной стороне блоков при замыканиях на землю. Для выяснения возможных принципов выполнения защиты необходимо представлять величину токов и напряжений нулевой

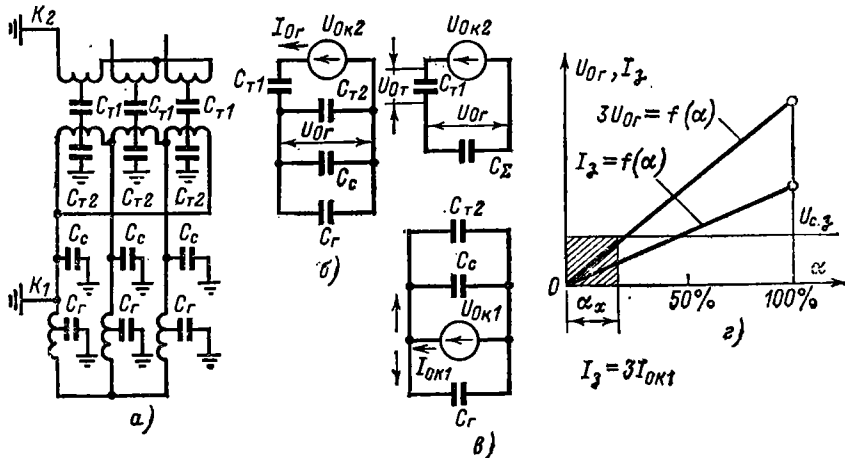


Рис. 17-8. Прохождение тока в элементах блока генератор — трансформатор при замыканиях на землю в генераторе и в сети.

а — полная схема замещения блока; б — схема замещения нулевой последовательности для одной фазы блока при замыкании на землю на стороне высшего напряжения (в точке K_2); в — схема замещения нулевой последовательности для одной фазы при замыкании на землю на стороне генераторного напряжения (в точке K_1); г — зависимость U_0 и I_3 от числа замкнувшихся на землю витков обмотки статора.

последовательности, появляющихся в цепях генераторного напряжения блоков во время замыканий на землю в сети высшего напряжения и в самом генераторе. При этом нужно учитывать две особенности блочных схем.

1) Блочные генераторы по принятым в Советском Союзе правилам работают с изолированной или с заземленной через дуго-гасящую катушку нейтралью.

2) Генераторы блоков связаны с сетью высшего напряжения через повысительный трансформатор. При такой схеме генератор не имеет электрической связи с сетью высшего напряжения, он связан с ней посредством электромагнитной индукции между обмотками трансформатора и электростатической индукции через емкость C_{T1} между этими же обмотками (рис. 17-8, а).

Емкость C_{T1} очень мала, она зависит от мощности и напряжения трансформаторов и составляет величину порядка 0,008—0,004 мкФ. Поэтому сопротивление связи $x_{св} = x_{T1} = 1/\omega C_{T1}$ получается значительным, а протекающий через него ток очень малым.

При замыкании на землю в сети высшего напряжения (например, в точке K_2 рис. 17-8, а) в месте повреждения, как известно (§ 9-1), возникает напряжение нулевой последовательности $U_{0к2}$. При металлическом замыкании на землю $U_{0к2} = \frac{1}{3} U_{\phi}$, здесь U_{ϕ} — фазное напряжение сети.

Под действием $U_{0к2}$ в цепи каждой фазы генератора возникает ток $I_{ог}$, замыкающийся через землю по контуру, образованному емкостью C_{T1} между обмотками трансформатора и емкостями на землю элементов сети генераторного напряжения: C_{T2} (обмоток трансформатора), C_c (токоведущей цепи между трансформатором и генератором), C_r (обмоток генератора) одной фазы.

Эквивалентная схема этого контура показана на рис. 17-8, б. Из схемы видно, что ток $I_{ог} = \frac{U_{0к2}}{x_{r1} + x_{св}}$, а напряжение нулевой

последовательности на стороне генератора блока $U_{ог} = I_{ог} x_{св}$, здесь $x_{T1} = 1/\omega C_{T1}$, а $x_{св} = 1/(C_{T2} + C_c + C_r)\omega$.

Величина $x_{T1} \gg x_{св}$ (в 100—50 раз), вследствие этого напряжение $U_{ог}$ очень мало и составляет 1—2% $U_{0к2}$. Поскольку абсолютное значение x_{T1} и $x_{св}$ велико, то ток $I_{ог}$ в сети генераторного напряжения также очень мал и изменяется долями ампера.

У генераторов, работающих непосредственно на сборные шины, при замыканиях на землю в сети напряжение $U_{ог} = U_{\phi.r}$, а ток $I_{ог}$, проходящий через генератор, достигает обычно нескольких ампер (см. § 9-1). Сопоставив эти данные для обеих схем включения генератора, можно сделать вывод, что *в блочных схемах значения $U_{ог}$ и $I_{ог}$ при замыканиях на землю в сети во много раз меньше, чем в схемах генераторов, работающих на сборные шины.* Это вызвано наличием большого емкостного сопротивления связи x_{T1} между генератором и сборными шинами блоков.

При замыкании на землю в генераторе блока (например K_1 на рис. 17-8, а) в месте замыкания появляется напряжение нулевой последовательности $U_{0к1} = \alpha U_{\phi.r}$, где α — количество замкнувшихся на землю витков обмотки генератора.

Если замыкание возникло в сети генераторного напряжения или на выводах обмотки генератора, то $\alpha = 1$ и $U_{0к1} = U_{\phi.r}$. Под действием $U_{0к1}$ возникает ток I_0 , который замыкается на землю через параллельно включенные емкости фаз относительно земли (C_r , C_{T2} , C_c) обмоток генератора, трансформатора и связывающих их токоведущих частей (кабелей или шин) (рис. 17-8, а, в):

$$I_0 = U_{0к1} \left(\frac{1}{x_{T2}} + \frac{1}{x_c} + \frac{1}{x_r} \right) = \alpha U_{\phi.r} \left(\frac{1}{x_{T2}} + \frac{1}{x_c} + \frac{1}{x_r} \right).$$

Поскольку $U_{0к1}$ пропорционально α , то и $I_0 \equiv \alpha$.

При изменении α от 0 до 1 напряжение $U_{ог}$ меняется от 0 до $U_{ог. макс} = U_{ф.г}$ и ток в месте замыкания $I_3 = 3I_0$ меняется от 0 до максимального значения, определяемого величиной $U_{ф.г}$:

$$I_3 = 3I_0 = 3U_{ф.г} \left(\frac{1}{x_{т2}} + \frac{1}{x_c} + \frac{1}{x_r} \right).$$

Характер зависимости $U_{ог}$ и I_3 от α показан на рис. 17-8, г. Величина емкостей элементов сети генераторного напряжения невелика, поэтому в месте замыкания на землю $I_3 = 3I_0$ относительно мал. Максимальное значение I_3 достигает 5 ÷ 10 А.

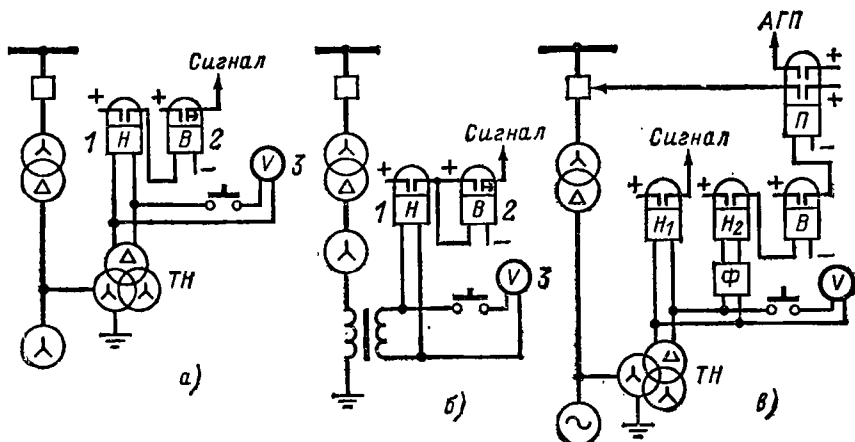


Рис. 17-9. Защита от замыканий на землю генератора при работе его по блочной схеме.

а — с трансформатором напряжения на выводах генератора; б — с трансформатором напряжения в нейтрале; в — с двумя комплектами защиты и включением пусковых реле через фильтр третьей гармоники.

Защита и ее принцип действия. С учетом приведенного выше анализа величин токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих на генераторной стороне блоков при замыканиях на землю в сети и в генераторе, в Советском Союзе широко применяется простая защита, реагирующая на появление U_0 на зажимах генератора. Селективность этой защиты при замыканиях на землю в сети, питающейся от блока, обеспечивается отстройкой от появляющегося при этом напряжения $U_{ог}$ на зажимах генератора.

Схемы защиты приведены на рис. 17-9. Защита состоит из реле напряжения 1, реагирующего на U_0 реле времени 2 и вольтметра 3.

Реле напряжения 1 включается на фильтр напряжения нулевой последовательности. В качестве такого фильтра обычно служит трансформатор напряжения ТН с соединением первичной обмотки в звезду, а вторичной — в разомкнутый треугольник. Для правильной работы фильтра нейтраль первичной обмотки должна

быть обязательно заземленной (§ 6-3). Напряжение на разомкнутом треугольнике $\dot{U}_{\Delta} = \dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C = 3\dot{U}_0$.

Трансформатор напряжения $TН$ устанавливается на выводах генератора. В качестве второго варианта включения реле I приведена схема на рис. 17-9, б. Здесь реле I питается от трансформатора напряжения в нейтрали генератора. В нормальных условиях напряжение нейтрали равно нулю, поэтому напряжение на вторичной обмотке $TН$ отсутствует. При замыканиях на землю в нейтрали появляется напряжение U_0 , которое трансформируется на вторичную сторону $TН$.

Обычно применяется схема по рис. 17-9, а, поскольку она использует имеющийся $TН$ для измерений. Рассмотрим ее работу.

В нормальных условиях напряжение $U_0 = 0$ и реле I по принципу своего действия не должно работать. Однако из-за погрешности в трансформации $TН$ и наличия третьих гармоник в напряжении, возникающих вследствие искажения синусоидальной формы кривой фазных э. д. с. генератора, на зажимах разомкнутого треугольника появляется напряжение небаланса:

$$U_{нб} = U_{нб\ TН} + U_{03}, \quad (17-4)$$

где $U_{нб\ TН}$ — напряжение небаланса из-за погрешности $TН$; U_{03} — напряжение третьей гармоники на зажимах генератора.

Для исключения работы защиты напряжения срабатывания реле I должно удовлетворять условию

$$U_{с.з} > U_{нб}. \quad (17-5)$$

При внешних замыканиях на землю за трансформаторами блока на стороне генераторного напряжения появляется $U_{0г} = I_0 x_{сг}$, к которому добавляется напряжение ΔU_{03} третьей гармонической.

Для исключения ложной работы защиты необходимо иметь:

$$U_{с.з} > (3U_{0г} + U_{03}). \quad (17-6)$$

При замыкании на корпус обмотки генератора появляется напряжение $U_{0г} = \alpha U_{ф.г}$. Защита приходит в действие при условии, что $3U_{0г} > U_{с.з}$.

Таким образом, рассмотренная защита имеет зону нечувствительности (жертвую зону) — она не действует, если $U_{с.з} < 3 U_{0г} = \alpha_x U_{ф.г}$. Здесь α_x — число витков, при которых напряжение $U_{0г}$ недостаточно для действия защиты, в процентах от полного числа витков обмотки фазы $\alpha_x = \frac{U_{с.з}}{U_{ф}} 100\%$.

Для уменьшения мертвой зоны нужно уменьшать $U_{с.з}$. Однако уменьшение $U_{с.з}$ ограничивается условием селективности (17-6).

Для повышения чувствительности защиты на мощных генераторах — 300, 500 МВт и больше реле напряже-

ния целесообразно включать через фильтр, не пропускающий напряжение третьих гармоник.

Подобная схема осуществляется с помощью реле напряжения РНН-57, включаемого через фильтр Φ , как показано на рис. 17-9, в. При частоте 50 Гц реле действует при напряжении U_0 4—8 В, а при частоте 150 Гц (третья гармоника) — загрубляется примерно в 8 раз. При наличии фильтра в выражениях (17-4) и (17-6) не учитывается составляющая U_{03} , что позволяет повысить чувствительность защиты.

По принципу действия защита может работать мгновенно, так как она отстроена от внешних замыканий на землю по напряжению срабатывания.

Однако для большей надежности из-за опасения появления феррорезонансного повышения напряжения в схеме предусмотрено реле времени $\mathcal{Z}$, позволяющее отстроиться от внешних к. з. на землю с выдержкой времени t_3 .

Выдержка t_3 принимается на ступень Δt больше времени действия t_d защит линий от замыканий на землю:

$$t_3 = t_d + \Delta t \approx 1 \div 1,5 \text{ с.} \quad (17-7)$$

Вследствие малой величины тока замыкания на землю (порядка 5А) такое замедление не может привести к развитию повреждения в генераторе. При токах замыкания на землю до 5 А защита выполняется с действием на сигнал, поскольку такой ток может допускаться длительное время, так как он не вызывает разрушения стали статора (см. § 9-2). *На мощных генераторах, особенно 300 МВт и выше, защиту целесообразно выполнять с действием на отключение.* Это позволит предотвратить развитие повреждения и обеспечить резервирование защиты от витковых замыканий. Витковые замыкания являются тяжелым видом повреждения и очень часто сопровождаются замыканиями на землю. Защита от витковых повреждений не имеет резервирования другими защитами. В случае отказа в работе витковой защиты повреждение будет развиваться, пока не перейдет в замыкание между фазами, на которое реагирует дифференциальная защита. Действие на отключение должно также предусматриваться, если ток замыкания на землю превосходит 5А.

Двухступенчатая защита для мощных блоков с действием на сигнал и отключение показана на рис. 17-9, в. Реле H_2 включено через фильтр Φ , не пропускающий токи высших гармоник. Вольтметр служит для контроля за исправностью цепей трансформатора напряжения, для контроля за изоляцией статора при включении генератора в сеть и для определения числа замкнувшихся витков фазы статора при действии защиты на сигнал.

Из принципа работы защиты вытекает, что она будет действовать при замыканиях на землю не только в генераторах, но и на всех элементах генераторного напряжения (обмотках

генераторного напряжения трансформаторов блока и собственных нужд и соединительных связях между ними и генератором).

Выбор уставок [Л. 6]. Напряжение срабатывания выбирается по условию селективности при замыканиях на землю в сети высшего напряжения (17-6).

Действующее значение напряжения срабатывания реле

$$U_{c.p} = k_n \frac{3}{n_n} \sqrt{U_{0r}^2 + U_{03}^2}, \quad (17-8)$$

где $\sqrt{U_{0r}^2 + U_{03}^2}$ — результирующее действующее значение составляющих основной частоты U_{0r} и третьей гармоники U_{03} [Л.29]; k_n — коэффициент надежности, принимаемый равным 1,3—1,5; n_n — коэффициент трансформации ТН.

На основании опыта эксплуатации $U_{c.з}$ принимается в схемах без фильтра третьей гармоники равным 10—15 В. В схемах с фильтром $U_{c.з} = 4 \div 6$ В.

Время действия защиты выбирается по выражению (17-7).

Чувствительность защиты характеризуется процентом витков обмотки статора α , не попавших в зону защиты, или, иначе говоря, зоной нечувствительности защиты, называемой мертвой зоной. Защита не работает, если напряжение $3U_0 < U_{c.з}$. Чем ближе к нейтрали возникло повреждение, тем меньше напряжение U_0 (см. рис. 17-8, г), поэтому мертвая зона защиты располагается вблизи нейтрали генератора. Граница мертвой зоны определяется из условия $3U_0 = U_{c.з}$; такому напряжению соответствует число замкнувшихся на землю витков $\alpha_{м.з}$. Считая, что $\alpha \equiv U_0$ и при $\alpha = 100\%$ напряжение $U_0 = U_\phi$, находим число витков, при котором защита не действует:

$$\alpha_{м.з} = \frac{U_{c.з}}{U_\phi} 100\%. \quad (17-9)$$

Зона нечувствительности может находиться графическим способом, как показано на рис. 17-8, г. Для уменьшения мертвой зоны необходимо уменьшать $U_{c.з}$. Однако чувствительность защиты ограничена условием (17-6), поэтому защита нулевой последовательности всегда имеет мертвую зону (примерно 5—15% витков) вблизи нейтрали генераторов.

Защита, не имеющая зоны нечувствительности (мертвой зоны).

На мощных генераторах с непосредственным охлаждением имеется повышенная возможность повреждения изоляции и появления замыкания на землю в любой точке обмотки статора, в том числе и вблизи нейтрали генератора. Если защита не реагирует на эти повреждения, то с течением времени они переходят в витковые замыкания, а затем в междуфазные короткие замыкания, которые обычно сопровождаются значительными разрушениями. По этой причине для мощных и дорогостоящих генераторов 300—500—800 МВт и более признано необходимым применять защиту от замыкания на землю, не имеющую мертвой зоны. *Разра-*

ботки подобной защиты ведутся в СССР и за рубежом. Для создания защиты, охватывающей всю обмотку статора, необходимо найти пути получения напряжения и тока, на которые могла бы реагировать защита при замыканиях на землю вблизи нейтрали генератора. Получение таких напряжений и токов возможно тремя способами:

1) путем искусственного смещения напряжения нейтрали генератора (рис. 17-10, а). При замыкании на землю под действием

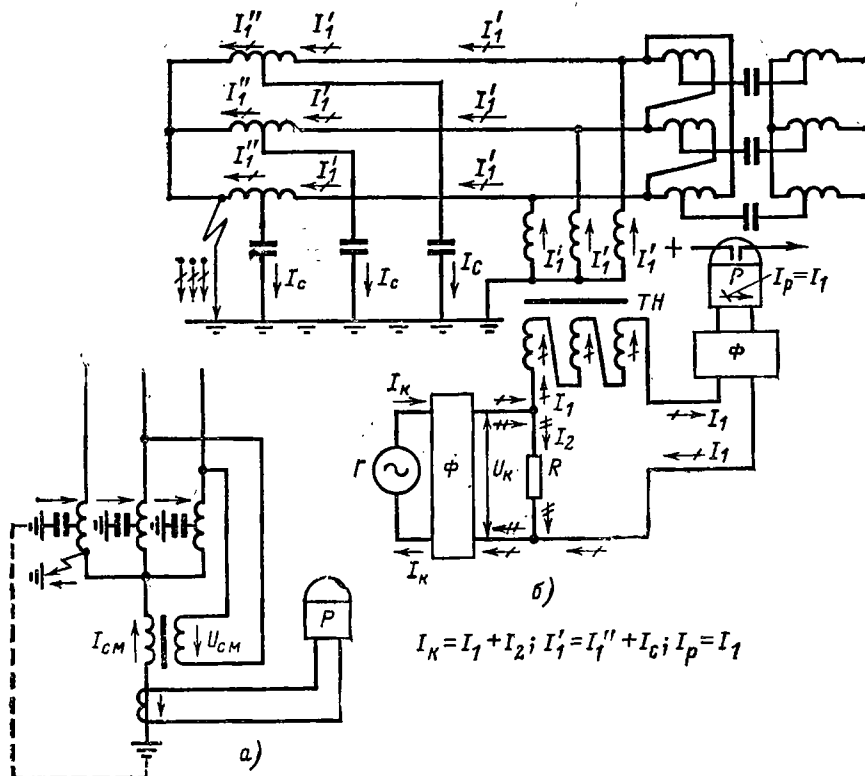


Рис. 17-10. Принципиальные схемы смещения нейтралей генератора для выполнения защиты без мертвой зоны.

I — генератор тока I_1 ; Φ — фильтр, пропускающий ток I_1 ; TH — трансформатор напряжения.

$I_1 = I_1 + I_2; I'_1 = I'_1'' + I_C; I_P = I_1$.

напряжения смещения $U_{см}$ появляется дополнительный ток $I_{см}$, на который может реагировать защита;

2) подключением к нейтрали генератора или в обмотку разомкнутого треугольника TH искусственно созданного напряжения U_K (рис. 17-10, б), контролирующего состояние изоляции статора. При замыкании на землю в любой точке обмотки статора под

влиянием напряжения U_N появляется ток I_N , вызывающий работу защиты. В качестве напряжения U_N используется напряжение промышленной частоты (например 100 или 20 Гц) или напряжение постоянного тока [Л. 115, 116];

3) использованием для действия защиты составляющих третьей гармоники, имеющихся в фазных э. д. с. генераторов [Л. 117, 111].

В Советском Союзе начинается выпуск защит, реагирующих на третью гармонику. Рассмотрим принцип их действия.

Защита, реагирующая на третью гармонику. Пространственная кривая магнитного поля (индукции B) в воздушном зазоре генераторов не точно синусоидальна и содержит гармоники, в том числе и третью. Как следствие этого, э. д. с. E_Φ , наводимая в фазах статора, имеет составляющие третьих гармоник $E_{(3)}$. Магнитное поле в воздушном зазоре создается н. с. ротора, а при наличии тока нагрузки и н. с. статора. Последняя изменяется с изменением нагрузки. В связи с этим величина э. д. с. $E_{(3)}$ также меняется с изменением тока нагрузки. Испытание и расчеты показывают, что в современных мощных машинах э. д. с. третьей гармоники составляет 1—3% э. д. с. E_Φ и в зависимости от нагрузки она может снижаться в 2—3 раза [Л. 111].

На использовании третьей гармоники во ВНИИЭ Минэнерго СССР разработана защита от замыкания на землю, не имеющая зоны нечувствительности. Защита состоит из двух комплектов (блоков) $K1$ и $K2$ (рис. 17-11, а). Комплект $K1$ реагирует на напряжение нулевой последовательности и защищает около 85—90% витков. Второй комплект $K2$ реагирует на напряжение третьей гармоники, он предназначен для работы в зоне нечувствительности первого комплекта $K1$.

Первый комплект (рис. 17-6) выполнен по схеме, аналогичной приведенной на рис. 17-9, а. Измерительный орган комплекта $K1$ на рис. 17-11, а включен на напряжение $3U_0$ через фильтр Φ_1 , пропускающий только основную гармонику. Ток, полученный от фильтра Φ_1 , выпрямляется выпрямителем B и подается на зажимы $m-n$ реагирующего реле. Это реле представляет собой триггер с одним устойчивым состоянием. Триггер работает аналогично рассмотренному в § 11-11, в. На выходе триггера установлено электромагнитное реле $P1$. Напряжение срабатывания пускового органа регулируется в пределах от 5 до 15 В.

Второй комплект реагирует на отношение модулей (абсолютных значений) напряжений третьих гармоник

$$\frac{|\dot{U}_N|}{|k\dot{U}_\Delta + \dot{U}_N|}, \quad (17-9a)$$

где U_N — напряжение третьей гармоники, получаемое от трансформатора напряжения $TN1$ (рис. 17-11, а), в нейтрали генератора N ; U_Δ — напряжение третьей гармоники утроенное, получаемое с зажимов разомкнутого треугольника трансформатора напряжения $TN2$; k — коэффициент равный $1/3$.

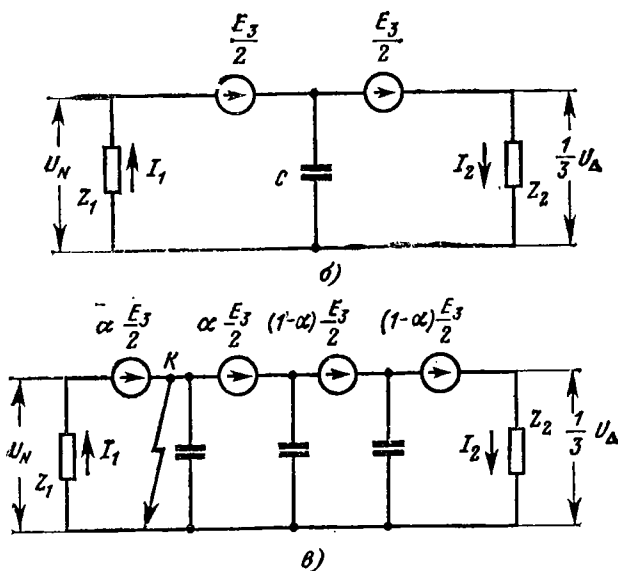
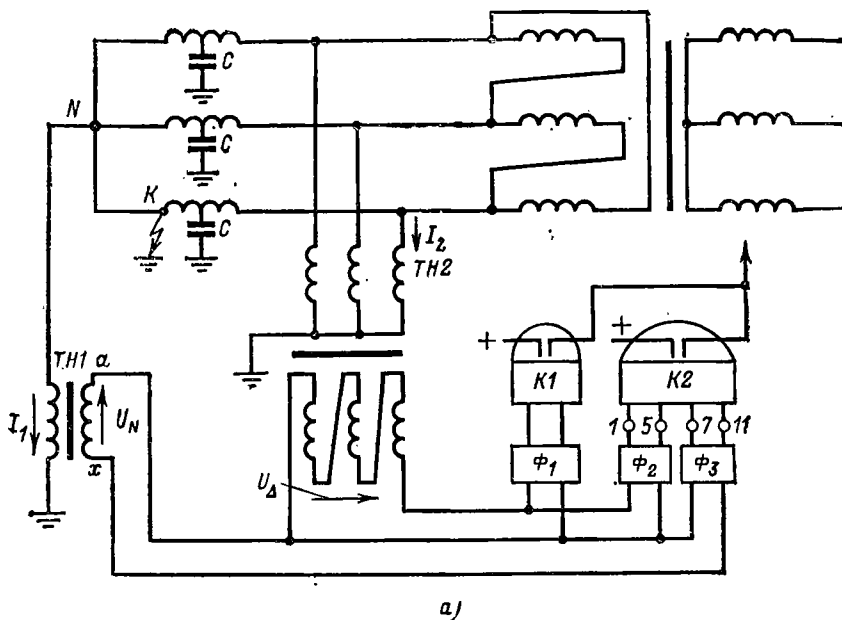


Рис. 17-11. Защита от замыканий на землю обмотки статора, реагирующая на составляющие третьей гармоники.

а — принципиальная схема; б — схема замещения для нормального режима; в — при замыкании на землю. Фильтр Φ_2 на рис. 17-11, а должен быть включен на сумму напряжений $U_{\Delta} + U_N$.

Рассматривая схемы замещения (рис. 17-11, б и в) можно показать [Л. 111], что выражение (17-9а) пропорционально отношению сопротивления z_N , замеренного со стороны нейтрали генератора между точкой N и землей, к удвоенному сопротивлению z_C обмотки генератора относительно земли, т. е., что

$$\frac{|\dot{U}_N|}{|\dot{U}_N + k\dot{U}_\Delta|} = \frac{z_N}{2z_C} = z_{N*}, \quad (17-9б)$$

где z_{N*} — относительное сопротивление в нейтрали N генератора, на которое реагирует рассматриваемый комплект защиты K_2 .

В нормальных условиях (при отсутствии повреждения в статоре) $z_{N*(н.р)} = \left| \frac{z_1}{\frac{2}{3} z_C} \right|$. Пренебрегая активными составляющими

z_1 и z_C , получим:

$$z_{N*(н.р)} = \frac{|jx_1|}{\left| -j \frac{2}{3} x_C \right|} = \frac{j\omega L}{-j \frac{2}{3} \frac{1}{\omega C}}. \quad (17-9в)$$

где L , z_1 и x_1 — индуктивность, полное и реактивное сопротивление первичной обмотки $TН1$; C и x_C — емкость и сопротивление по отношению к земле одной фазы сети генераторного напряжения; ω_3 — угловая частота третьей гармоники.

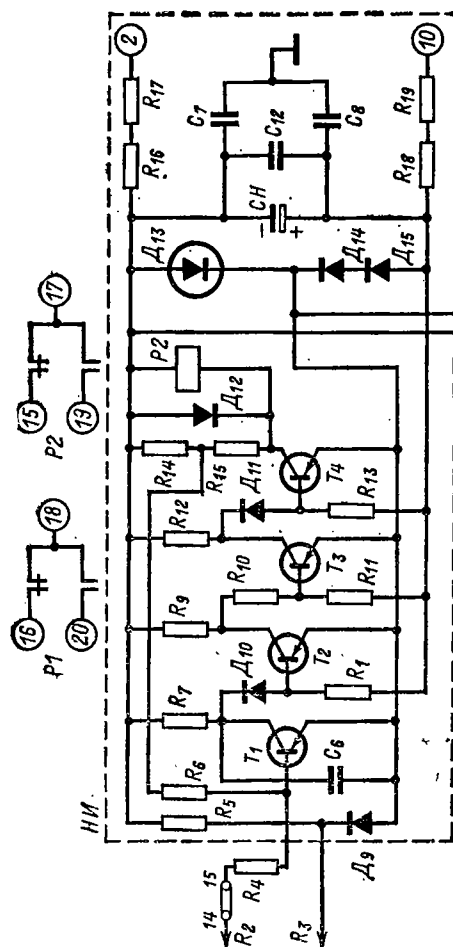
При этом сопротивлении ($z_{N(н.р)}$) комплект K_2 не должен действовать. Для этого необходимо выполнить условие $z_{c.з} < z_{N(н.р)}$.

При металлическом замыкании в нейтрали генератора $TН1$ оказывается зашунтированным. В этом случае напряжение $U_N = 0$, в результате чего $z_N = 0$ и комплект K_2 приходит в действие, так как $z_N < z_{c.з}$.

При удалении точки замыкания на землю от нейтрали N сопротивление z_N увеличивается и приблизительно при $\alpha \geq 50\%$ комплект K_2 перестанет действовать, так как z_N станет больше $z_{c.з}$. Но при таком повреждении надежно работает комплект защиты K_1 .

Рассмотренное реле сопротивления построено на сравнении абсолютных значений двух напряжений тормозного $\dot{U}_N$ и рабочего $k\dot{U}_\Delta + \dot{U}_N$ (рис. 17-12). Эти напряжения подводятся через фильтры третьей гармоники Φ к выпрямителям B_2 и B_1 . Разность выпрямленных напряжений $|k\dot{U}_\Delta + \dot{U}_N| - |\dot{U}_N|$ подается на четырехкаскадный нуль-индикатор $НИ$, на выходе которого установлено исполнительное реле P_2 типа РП-211. Реле действует, если $|k\dot{U}_\Delta + \dot{U}_N| > |\dot{U}_N|$. При замыкании на землю в нейтрали N $U_N = 0$ и реле работает. На рассмотренном принципе ЧЭАЗ готовит выпуск защиты ЗЗГ-2.

Во ВНИИЭ разработан в т о р о й в а р и а н т защиты с использованием составляющих третьей гармоники. Он основан на различии скорости изменения величины напряжения третьей



гармоники $U_{\Delta(3)}$ при изменении нагрузки и при возникновении замыкания на землю. В первом случае изменение величины $U_{\Delta(3)}$ происходит относительно медленно, а во втором — быстро. Это объясняется различием постоянных времени, определяющих скорость изменения электрических величин в переходном режиме. Измерительный орган защиты выполняется в виде реле, реагирующего на скорость изменения $U_{\Delta(3)}$, или, иначе говоря, на производную $\frac{dU_{\Delta(3)}}{dt}$.

Как и в предыдущем случае, защита состоит из двух комплектов: блока, реагирующего на $3 U_0$, и блока третьей гармоники, реагирующего на $\frac{dU_{\Delta(3)}}{dt}$. Обе защиты должны пройти проверку в условиях эксплуатации.

д) Взаимодействие с технологическими защитами блока

Выше отмечалось, что основные элементы блока: котел, турбина, генератор, трансформатор — представляют единое целое. Отключение повысительного трансформатора или генератора означает прекращение работы блока и нарушение режима работы турбины и котла. В зависимости от причин отключения электрического оборудования блока и возможности его обратного включения возможен перевод тепловой части блока в один из двух режимов:

- 1) полной остановки турбины и погашения котла;
- 2) перевод блока на холостой ход.

При повреждении генератора и повысительного трансформатора дальнейшая работа блока невозможна, поэтому защиты от внутренних повреждений генератора и повысительного трансформатора должны воздействовать через цепи технологических защит на остановку турбины и погашение котла.

При отключении блока вследствие к. з. в сети или перегрузки генератора целесообразен перевод турбины и котла в режим холостого хода, так как в этих случаях должны приниматься меры к быстрому включению блока в сеть. В соответствии с этим первые ступени защиты от внешних к. з. (действующих на отключение выключателя блока) должны одновременно воздействовать на перевод тепловой части блока в режим холостого хода.

е) Пуск от защиты устройств пожаротушения на повысительных трансформаторах блока

Мощные повысительные трансформаторы снабжаются автоматическими устройствами пожаротушения водой или многократной пеной. Пуск установок пожаротушения осуществляется от газовой и дифференциальной защит трансформатора (не блока). Пуск пожаротушения разрешается при действии указанных защит и фиксации (с помощью реле минимального напряжения) отсутствия

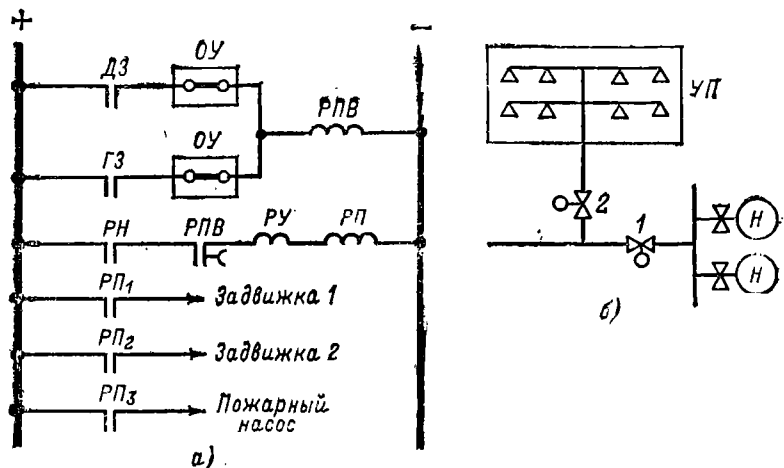


Рис. 17-13. Принципиальная схема пуска от защиты установки для тушения пожара трансформатора.

а — схема пуска; б — схема установки; Н — пожарный насос; УП — установка тушения пожара трансформатора.

напряжения на трансформаторе. В руководящих указаниях [Л. 5 и 6] предусматривается пуск установки пожаротушения от защит трансформатора, реагирующих на их повреждение, с блокировкой от защиты замыкания на корпус трансформатора, рассмотренный в § 16-11. Такой способ пуска сложнее первого и обеспечивает действие устройства пожаротушения только при повреждениях, связанных с замыканием на землю. Оба способа пуска несовершенны — они приводят в действие установку пожаротушения при всех повреждениях в трансформаторе, в том числе и при повреждениях, не сопровождающихся пожаром. Схема пуска от защиты пожарной установки показана на рис. 17-13. Автоматический пуск устройства пожаротушения от защиты должен выполняться на крупных трансформаторах и на трансформаторах, пожар которых может распространиться на соседние объекты.

ГЛАВА ВОСЕМНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ¹

18-1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Релейная защита электродвигателей, так же как и защита генераторов и трансформаторов, должна реагировать на внутренние повреждения и опасные ненормальные режимы [Л. 75, 76].

¹ Эта глава написана совместно с Н. В. Виноградовым.

Весьма важно, чтобы электродвигатели не отключались защитой при неопасных ненормальных режимах, так как такие отключения могут иметь массовый характер и нанести большой ущерб промышленности.

Защиту электродвигателей следует выполнять простой и дешевой, так как применение дорогих защит не оправдывается. Для мощных электродвигателей 2 000 кВт и выше возможно применение более сложных защит.

Особое по своей ответственности место среди электродвигателей занимают электродвигатели механизмов собственных нужд электрических станций. Отключение этих электродвигателей из-за неправильного действия защиты может нарушить нормальную работу электростанции, поэтому защита электродвигателей ответственных механизмов электростанций должна отличаться особой надежностью.

Большое значение для бесперебойной работы промышленных предприятий и особенно собственных нужд электростанции имеет самозапуск электродвигателей. Самозапуск электродвигателей заключается в том, что при кратковременном понижении напряжения в сети, питающей электродвигатели, они не отключаются и после восстановления напряжения вновь разворачиваются до нормальной скорости вращения (т. е. «сами запускаются»). Наиболее часто кратковременные понижения напряжения происходят в результате к. з. и при автоматическом переключении двигателей с одного источника питания на другой в результате действия АВР.

Возможность и большая эффективность самозапуска электродвигателей впервые были доказаны в СССР. Многолетняя практика эксплуатации электродвигателей в Советском Союзе опровергла мнение о недопустимости самозапуска, и в настоящее время самозапуск электродвигателей является обязательным [Л. 75].

В связи с этим защита электродвигателей должна обеспечивать возможность их самозапуска, т. е. она не должна преждевременно отключать электродвигатели как при понижении напряжения, так и при его восстановлении.

Наибольшее распространение как в промышленности, так и особенно на собственных нуждах электрических станций имеют асинхронные электродвигатели. Поэтому их защите в этой главе уделяется основное внимание.

Защита синхронных двигателей кратко рассматривается в § 18-11.

18-2. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ЗАЩИТ, ПРИМЕНЯЕМЫХ НА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Наиболее частыми повреждениями в электродвигателях являются междуфазные к. з. в обмотках статора. Междуфазные к. з. вызывают значительные разрушения и сопровождаются понижением напряжения в питающей сети с нарушением нормальной

работы остальных потребителей. Поэтому защита электродвигателей от междуфазных повреждений является обязательной.

Однофазные замыкания обмотки статора на землю менее опасны, так как сети, от которых питаются электродвигатели, как правило, работают с изолированными нейтральными. Защита электродвигателей от замыкания на землю устанавливается в тех случаях, когда ток замыкания на землю достигает 5—10 А (см. ниже).

Специальные защиты от витковых замыканий в одной фазе статора не применяются, так как простых способов ее выполнения на сегодняшний день не существует.

Наиболее частым ненормальным режимом для электродвигателей является перегрузка током.

Прохождение повышенных токов сверх определенного времени опасно для электродвигателей. Поэтому на электродвигателях, подверженных перегрузкам, устанавливается защита от перегрузки, которая в зависимости от условий работы и обслуживания электродвигателей выполняется действующей на сигнал, разгрузку приводимого механизма или отключение электродвигателя.

В некоторых случаях является недопустимым или нежелательным самозапуск электродвигателей при восстановлении напряжения после кратковременного его исчезновения. Такое положение может иметь место по условиям технологии производства или безопасности персонала, а также бывает необходимо для ограничения токов самозапуска путем отключения части малоответственных электродвигателей (см. § 18-3). На таких электродвигателях устанавливается защита минимального напряжения, действующая на их отключение.

18-3. НЕКОТОРЫЕ СВОЙСТВА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Вращающий момент электродвигателей и момент сопротивления механизма. Нормальный установившийся режим работы электродвигателя характеризуется равенством момента M_d , развиваемого электродвигателем, и момента сопротивления M_c механизма, приводимого электродвигателем:

$$M_d = M_c. \quad (18-1)$$

Если $M_d < M_c$, то электродвигатель будет тормозиться, а если $M_d > M_c$, то частота вращения электродвигателя будет увеличиваться.

При неизменном напряжении питающей сети момент, развиваемый электродвигателем, зависит от частоты вращения n или, что то же, от скольжения s (рис. 18-1). В нормальных условиях равенство $M_d = M_c$ имеет место при $s = 2 \div 5\%$. Максимальный момент двигателя $M_{d, \max}$ равен примерно двукратному номинальному моменту, т. е.

$$\frac{M_{d, \max}}{M_{d, \text{ном}}} \approx 2. \quad (18-2)$$

Частота вращения n_k и скольжение s_k , соответствующие максимальному моменту, называются критическими.

Пусковой момент $M_{d, \text{пуск}}$, соответствующий частоте вращения $n = 0$ или скольжению $s = 1$, в зависимости от конструкции электродвигателя имеет различные величины (кривые 1, 2, 3 рис. 18-1).

Характеристики моментов сопротивления механизмов, приводимых электродвигателями, в зависимости от их частоты вращения могут быть разделены на два типа: зависящие от частоты вращения (кривая 5) и не зависящие от нее (кривая 4, рис. 18-1).

Момент сопротивления, не зависящий от частоты вращения, имеют, например, шаровые мельницы. Момент сопротивления, резко зависящий от частоты вращения, имеют все центробежные механизмы.

Ток, потребляемый статором электродвигателя из сети, I_d состоит из тока намагничивания $I_{нам}$ статора и тока ротора, приведенного к обмотке статора, $I'_{рот}$, т. е.

$$I_d = I_{нам} + I'_{рот}. \quad (18-3)$$

Это следует из схемы замещения, представленной на рис. 18-2.

Ток в роторе определяется наведенной в нем э. д. с., которая зависит от скольжения (т. е. скорости пересечения обмотки ротора магнитным потоком статора электродвигателя). В результате этого ток ротора и статора также меняются с изменением скольжения.

Примерный характер зависимости периодической составляющей тока статора I_d и сопротивления электродвигателя z_d от скольжения представлен на рис. 18-3.

При нормальной работе электродвигателя, когда скольжение составляет 2—5%

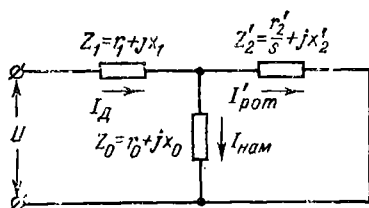


Рис. 18-2. Схема замещения асинхронного электродвигателя.

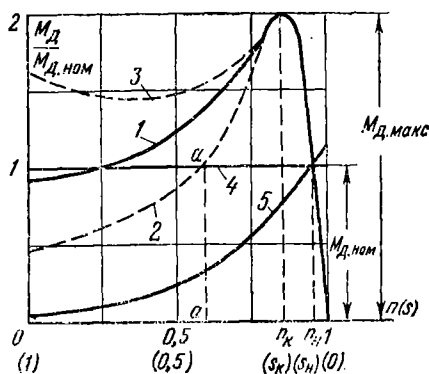


Рис. 18-1. Зависимость момента вращения асинхронных электродвигателей и момента сопротивления механизмов от частоты вращения.

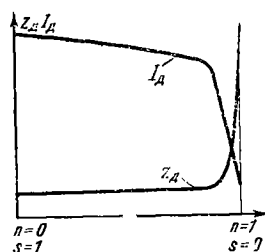


Рис. 18-3. Зависимость тока статора и сопротивления электродвигателя от скольжения s .

(т. е. близко к нулю), сопротивление ротора очень велико, ток ротора мал, а значит мал и ток статора, так как вевь намагничивания имеет большое сопротивление.

Пуск электродвигателей. При пуске, т. е. подаче напряжения на неподвижный электродвигатель, сопротивление его мало и ток ротора имеет максимальное значение. Соответственно максимальное значение имеет и ток статора. Ток статора при пуске электродвигателя называется пусковым током. По величине начальный пусковой ток равен току трехфазного к. з. за сопротивлением, равным сопротивлению неподвижного электродвигателя.

Пусковой ток состоит из переменной составляющей, затухающей по мере увеличения частоты вращения, и аperiodической составляющей, которая затухает по экспоненциальной кривой в течение нескольких периодов.

Осциллограмма пуска двигателя представлена на рис. 18-4. Из осциллограммы видно, что по мере разворота ток, потребляемый электродвигателем, меняется сначала мало и только при приближении к синхронной частоте вращения он быстро спадает. Объясняется это характером изменения сопротивления двигателя.

Периодическая составляющая пускового тока электродвигателя $I_{п.пуск}$ при неподвижном роторе обычно в 4—8 раз превосходит его номинальный ток. В отдельных случаях эта величина бывает больше. Максимальный пик тока с учетом аperiodической составляющей достигает:

$$I_{д.пуск} = (1,6 \div 1,8) I_{п.пуск} \quad (18-4)$$

Продолжительность затухания периодической составляющей пускового тока до значения номинального тока зависит от параметров электродвигателя и условий пуска.

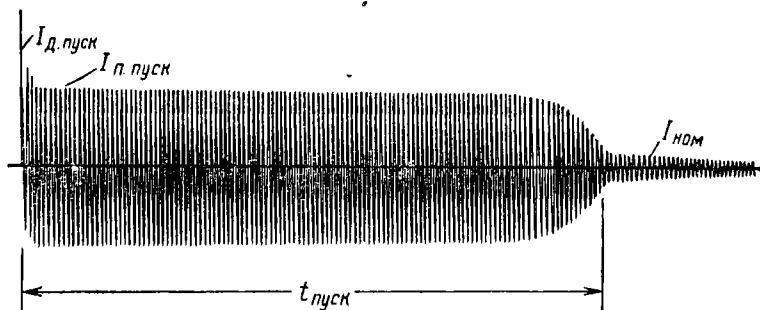


Рис. 18-4. Осциллограмма пускового тока асинхронного электродвигателя.

При пуске с нагрузкой развертывание электродвигателя до номинальной скорости происходит медленнее и продолжительность спада тока увеличивается. Это объясняется тем, что ускорение вращения ротора зависит от величины избыточного момента:

$$M_{изб} = M_d - M_c.$$

Если M_d превосходит M_c во все время пуска, то электродвигатель пускается быстро и легко. Как видно из рис. 18-1, электродвигатели, приводящие механизмы с зависимым от частоты вращения моментом сопротивления, пускаются легче, чем электродвигатели, приводящие механизмы с независимым от частоты вращения моментом сопротивления. В последнем случае при недостаточной величине пускового момента электродвигатели могут вообще не развернуться (кривые 2 и 4, рис. 18-1), так как, начиная со скольжения, соответствующего точке a , M_c превосходит M_d и, следовательно, избыточный момент на валу двигателя отрицательный.

Электродвигатели с фазным ротором при отсутствии пускового сопротивления в цепи обмотки ротора имеют меньший начальный момент по сравнению с другими типами электродвигателей.

Поэтому по условиям самозапуска для ответственных механизмов собственных нужд предпочитают применять электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

Электродвигатели с глубоким пазом и двойной обмоткой ротора имеют наиболее благоприятный пусковой момент (кривая 3, рис. 18-1). Длительность пуска электродвигателей $t_{пуск}$, как правило, не превосходит 10—15 с, и

только у электродвигателей с тяжелыми условиями пуска эта величина может быть значительно больше.

При возникновении к. з. в питающей сети вблизи зажимов электродвигателя последний за счет внутренней э. д. с., поддерживаемой энергией магнитного поля, посылает к месту к. з. быстро затухающий ток. По величине броски тока к. з. могут достигать значений пусковых токов.

Зависимость момента электродвигателей от напряжения характеризуется соотношением

$$M_d = kU^2. \quad (18-5)$$

При к. з. в сети напряжение на зажимах электродвигателей снижается. В результате этого моменты электродвигателей уменьшаются и двигатели начинают тормозиться, увеличивая скольжение (рис. 18-5) до тех пор, пока вновь не восстановится равенство (18-1).

Если при этом окажется, что $M_{д. макс} = M_c$ (точка *a* на рис. 18-5), то электродвигатель будет находиться на пределе устойчивой работы и будет иметь скольжение, равное критическому. При дальнейшем снижении напряжения электродвигатель будет тормозиться вплоть до полной остановки.

Для электродвигателей, приводящих механизмы с независимым от частоты вращения моментом M_c (прямая 2 на рис. 18-5), легко может быть определено предельное снижение напряжения $U_{пред}$, при котором еще сохраняется устойчивая работа. Действительно, учитывая соотношение (18-5) и полагая $M_{д. ном} = M_c$, имеем:

$$\frac{M_{д. макс}}{M_{д. ном}} = \frac{U_{ном}^2}{U_{пред}^2}, \quad (18-6)$$

а принимая во внимание выражение (18-2), из (18-6) получаем:

$$U_{пред} = 0,7U_{ном}. \quad (18-7)$$

Электродвигатели, приводящие механизмы с зависимым от частоты вращения моментом M_c (кривая 3 на рис. 18-5), во многих случаях сохраняют устойчивую работу даже при большом снижении напряжения питания.

После отключения к. з. напряжение питания восстанавливается до нормального значения или из-за повышенного тока электродвигателей оказывается несколько ниже этого значения и момент, развиваемый электродвигателем, определяется кривой 1'' (рис. 18-5). Дальнейшее поведение электродвигателя будет зависеть от скольжения, имевшего место в момент восстановления напряжения, и соответствующих ему значений M_d и M_c . При $M_d > M_c$ электродвигатель развернется до нормальной частоты вращения, а при $M_d < M_c$ будет продолжать тормозиться до полной остановки. В этом случае электродвигатель необходимо отключить, так как он будет потреблять пусковой ток, не имея возможности развернуться.

Самозапуск электродвигателей несколько тяжелее обычного пуска. Объясняется это тем, что при самозапуске электродвигатели пускаются нагруженными, а электродвигатели с фазным ротором пускаются без пускового реостата в цепи ротора, что уменьшает их пусковой момент и увеличивает пусковой ток, и, наконец, пускается большое количество электродвигателей одновременно, что вызывает падение напряжения в питающей сети от суммарного пускового тока. Все это снижает пусковой момент и утяжеляет процесс пуска.

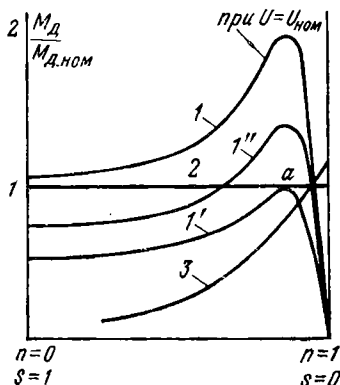


Рис. 18-5. Зависимость момента вращения асинхронных двигателей от скольжения s при различных значениях напряжения.

Самозапуск короткозамкнутых электродвигателей, а тем более электродвигателей с глубоким пазом и двойной обмоткой ротора проходит сравнительно легко. Опыт эксплуатации показывает, что самозапуск электродвигателей с фазным ротором неопасен для этих двигателей и возможен даже при условии, что пусковой момент при отсутствии пускового сопротивления в роторе больше момента сопротивления механизма.

Для обеспечения самозапуска необходимо выполнение двух условий:

а) Начальное значение восстановившегося напряжения должно быть достаточным для разворачивания электродвигателей или, иначе говоря, при начальном значении восстановившегося напряжения (U_d) должно обеспечиваться условие

$$M_d > M_c.$$

б) Защита электродвигателей не должна их отключать под действием тока самозапуска.

Проведенные исследования показали, что самозапуск электродвигателей собственных нужд электростанций возможен даже в тех случаях, когда в первый момент после восстановления напряжения величина его составляет $0,55 U_{ном}$. При этом продолжительность самозапуска всех электродвигателей составляет 30—35 с, что допустимо по условиям их нагрева.

18-4. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ

Защита от к. з. между фазами является основной защитой электродвигателей, и установка ее обязательна во всех случаях.

В качестве защиты электродвигателей от к. з. применяется максимальная токовая защита мгновенного действия (ток о в а я о т с е ч к а), отстроенная от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателей. При недостаточной чувствительности токовой отсечки на мощных электродвигателях 2000 кВт и больше, имеющих шесть выводов, может применяться дифференциальная токовая защита. На электродвигателях 5000 кВт и более установка дифференциальной защиты считается обязательной.

Электродвигатели напряжением 500 В и ниже, как правило, защищаются от к. з. плавкими предохранителями. Предохранители могут применяться и на электродвигателях более высокого напряжения, если только разрывная мощность предохранителей достаточна для разрыва тока к. з.

Для защиты электродвигателей целесообразно применение переменного оперативного тока (рис. 18-6, а), а также реле прямого действия, что упрощает вторичную коммутацию и дает существенную экономию контрольного кабеля ввиду большого количества электродвигателей на предприятиях и электростанциях.

Для защиты электродвигателей целесообразно применение переменного оперативного тока (рис. 18-6, а), а также реле прямого действия, что упрощает вторичную коммутацию и дает существенную экономию контрольного кабеля ввиду большого количества электродвигателей на предприятиях и электростанциях.

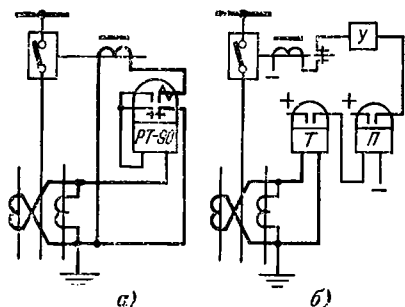


Рис. 18-6. Токовая защита двигателей от к. з., выполненная по однопорелейной схеме.

а — на переменном оперативном токе;
б — на постоянном оперативном токе.

Защита от к. з. выполняется, как правило, двухфазной, так как токи замыкания на землю в сетях, от которых питаются двигатели, обычно невелики. При этом трансформаторы тока целесообразно ставить около выключателя со стороны двигателя. Во всех случаях, когда это возможно по чувствительности, преимущество отдается однорелейной схеме защиты (трансформаторы тока включаются на разность токов двух фаз).

Защита по схеме на рис. 18-6, а, выполненная при помощи реле типа РТ-86, применяется для электродвигателей, подверженных перегрузке. При этом отсечка используется в качестве защиты от к. з., а индукционный элемент — для защиты от перегрузки.

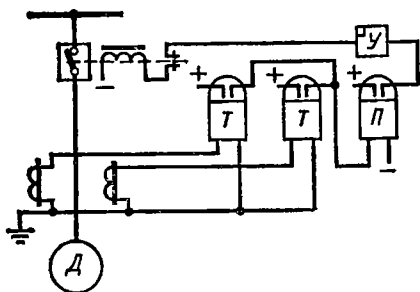


Рис. 18-7. Защита двигателей от к. з. в двухрелейном исполнении на постоянном оперативном токе.

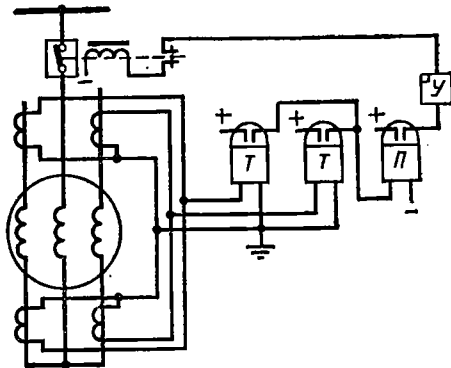


Рис. 18-8. Дифференциальная защита мощного электродвигателя.

Реле РТ-86 имеют два независимых контакта: один — у индукционного элемента (сигнальный), другой — у отсечки, действующий на отключение. Контакт отсечки достаточно мощен и может действовать на отключение выключателя непосредственно. На электродвигателях, не подверженных перегрузкам, устанавливается токовое реле типа РТ по схеме на рис. 18-6, б. Контактная система его не может работать на катушку отключения. Поэтому в схеме предусмотрено промежуточное реле.

В случаях, когда однорелейная схема защиты электродвигателей не обеспечивает требуемой чувствительности при двухфазных к. з. (что может иметь место на крупных электродвигателях с большими пусковыми токами), применяется двухрелейная схема защиты (рис. 18-7).

Схема защиты на рис. 18-7 более чувствительна к двухфазным к. з., чем схема на рис. 18-6.

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н а я з а щ и т а электродвигателей приведена на рис. 18-8. Дифференциальная защита дает возможность получить значительно большую чувствительность,

чем максимальная токовая защита, так как броски тока от электродвигателя при внешних к. з. и токи пуска и самозапуска, от которых отстраивается максимальная токовая защита, в схеме дифференциальной защиты оказываются сбалансированными.

Ток срабатывания токовой отсечки от междупазных к. з. отстраивается от бросков тока, посылаемых электродвигателем в первый момент к. з. в сети, питающей двигатель, и от пускового тока электродвигателя при полном напряжении питающей сети и выведенном пусковом сопротивлении в цепи ротора (для электродвигателей с фазным ротором).

Определяющим, как правило, является второе условие.

Если защита выполнена при помощи быстродействующих реле типа РТ, имеющих достаточно высокий коэффициент возврата (порядка 0,85), то для отстройки от аperiodической составляющей пускового тока устанавливается промежуточное реле, замедляющее действие защиты на 0,04—0,06 с. Ток срабатывания защиты в этом случае выбирают из условия возврата реле ЭТ или РТ при максимальном значении периодического пускового тока $I_{п.пуск}$, учитывая, что аperiodическая составляющая пускового тока затухает до того, как успеет подействовать промежуточное реле защиты. Первичный ток срабатывания защиты равен:

$$I_{с.з} = \frac{k_n I_{п.пуск}}{k_{воз}}. \quad (18-8)$$

Коэффициент k_n обычно принимается равным 1,2. Максимальное значение периодической составляющей пускового тока $I_{п.пуск}$ берется по данным завода или определяется путем испытаний.

Защита, выполненная с реле типа РТ-80, имеющим большую инерционность и плохой коэффициент возврата отсечки (порядка 0,3—0,4), сработав под влиянием первоначального броска пускового тока, не сможет вернуться после затухания его аperiodической составляющей. Поэтому ток срабатывания подобных реле отстраивается от максимального значения пускового тока $I_{д.пуск}$. Первичный ток срабатывания принимается равным:

$$I_{с.з} = k_n I_{д.пуск} = k_n \cdot 1,8 I_{п.пуск}, \quad (18-9)$$

где k_n — коэффициент надежности, обычно принимаемый равным 1,2; 1,8 — коэффициент, учитывающий аperiodическую составляющую пускового тока. Вторичный ток срабатывания защиты находится по формуле

$$I_{с.р} = \frac{k_{сх} I_{с.з}}{n_T}, \quad (18-10)$$

где $k_{сх}$ — коэффициент схемы, учитывающий схему соединения трансформаторов тока, используемых для защиты; при соединении трансформаторов тока на разность токов двух фаз (рис. 18-6)

$k_{сх} = \sqrt{3}$, а при соединении их по схеме неполной звезды (рис. 18-7) $k_{сх} = 1$; n_T — коэффициент трансформации трансформаторов тока защиты.

Ток срабатывания дифференциальной защиты двигателей при условии идентичности трансформаторов тока дифференциальной схемы и выбора их по кривым 10%-ной кратности принимается равным:

$$I_{с.з} = (1,5 \div 2) I_{ном}. \quad (18-11)$$

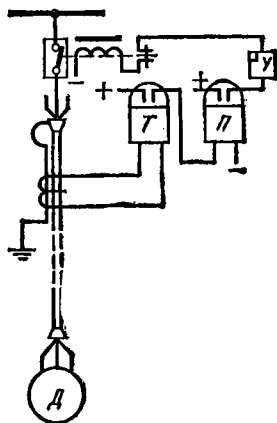
Чувствительность защиты от междуфазных к. з. электродвигателя оценивается коэффициентом чувствительности, представляющим собой отношение тока металлического двухфазного к. з. на выводах двигателя при минимальном режиме работы питающей сети к первичному току срабатывания защиты двигателя:

$$k_q = \frac{I_{к. мин}^{(2)}}{I_{с.з}}.$$

18-5. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ЗАМЫКАНИЙ ОДНОЙ ФАЗЫ НА ЗЕМЛЮ

Защита от замыкания на землю устанавливается на двигателях до 2000 кВт только в том случае, если ток замыкания на землю $I_z \geq 10$ А. В связи с небольшой стоимостью маломощных электродвигателей установка на них защиты от замыканий на землю считается нецелесообразной.

На мощных двигателях (2000 кВт и больше) защита устанавливается так же, как и на генераторах при токе $I_z \geq 5$ А. Защита выполняется с действием на отключение без выдержки времени (рис. 18-9) с использованием трансформатора тока нулевой последовательности (ТНП) типа ТЗЛ или ТЗРЛ.



18-6. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПЕРЕГРУЗКИ

Перегрузка электродвигателя возникает в следующих случаях:

- при затянувшемся пуске или самозапуске;
- по техническим причинам и перегрузке механизмов;
- в результате обрыва одной фазы;
- при повреждении механической части электродвигателя или механизма, вызывающем увеличение момента M_c и торможение электродвигателя.

Рис. 18-9. Защита электродвигателей от замыканий на землю одной фазы.

Перегрузки бывают устойчивыми и кратковременными. Для электродвигателя опасны только устойчивые перегрузки.

Сверхтоки, обусловленные пуском или самозапуском электродвигателя, кратковременны и самоликвидируются при достижении нормальной частоты вращения. Эти токи могут представлять опасность, только если процесс развертывания электродвигателя затянется или если при самозапуске окажется, что $M_{д.нач} < M_{с.нач}$. В последнем случае электродвигатель развернуться не сможет и длительно будет обтекаться пусковым током.

Значительное увеличение тока электродвигателя получается также при обрыве фазы, что встречается, например, у электродвигателей, защищаемых предохранителями, при перегорании одного из них. При номинальной нагрузке в зависимости от параметров электродвигателя увеличение тока статора при обрыве фазы будет составлять примерно $(1,6 \div 2,5) I_{ном}$. Эта перегрузка носит устойчивый характер. Также устойчивый характер носят сверхтоки, обусловленные механическими повреждениями электродвигателя или вращаемого им механизма и перегрузкой механизма.

Основной опасностью сверхтоков для электродвигателя является сопровождающее их повышение температуры отдельных частей и в первую очередь обмоток.

Повышение температуры ускоряет износ изоляции обмоток и снижает срок службы электродвигателя.

Перегрузочная способность электродвигателя определяется характеристикой зависимости между величиной сверхтока и допусаемым временем его прохождения:

$$t = T \frac{a-1}{k-1}, \quad (18-12)$$

где t — допустимая длительность перегрузки, с; T — постоянная времени нагрева, с; a — коэффициент, зависящий от типа изоляции двигателя, а также периодичности и характера сверхтоков; для асинхронных электродвигателей в среднем $a = 1,3$; k — кратность сверхтока, т. е. отношение тока двигателя I_d к его номинальному току:

$$k = \frac{I_d}{I_{ном}}.$$

Вид перегрузочной характеристики при постоянной времени нагрева $T = 300$ с представлен на рис. 18-10.

При решении вопроса об установке защиты от перегрузки на электродвигателе и характере ее действия руководствуются условиями его работы.

а) *На электродвигателях механизмов, не подверженных технологическим перегрузкам (например, электродвигателях циркуляционных, питательных насосов и т. п.) и не имеющих*

тяжелых условий пуска или самозапуска, защита от перегрузки не устанавливается.

б) На электродвигателях, подверженных технологическим перегрузкам (например, электродвигателях мельниц, дробилок, багерных насосов и т. п.), а также на электродвигателях, самозапуск которых не обеспечивается, защита от перегрузки должна устанавливаться.

в) Защита от перегрузки выполняется с действием на отключение в случае, если не обеспечивается самозапуск электродвигателей или с механизма не может быть снята технологическая перегрузка без остановки электродвигателя.

г) Защита от перегрузки электродвигателя выполняется с действием на разгрузку механизма или сигнал, если технологическая перегрузка может быть снята с механизма автоматически или вручную персоналом без остановки механизма и электродвигатели находятся под наблюдением персонала.

д) На электродвигателях механизмов, могущих иметь как перегрузку, устраняемую при работе механизма, так и перегрузку, устранение которой невозможно без остановки механизма, целесообразно предусматривать действие защиты от сверхтоков с меньшей выдержкой времени на разгрузку механизма (если это возможно) и большей выдержкой времени на отключение электродвигателя. Ответственные электродвигатели собственных нужд электрических станций находятся под постоянным наблюдением дежурного персонала, поэтому защита их от перегрузки выполняется преимущественно с действием на сигнал.

Защиту электродвигателей, подверженных технологической перегрузке, желательно иметь такой, чтобы она, с одной стороны, защищала от недопустимых перегрузок, а с другой — давала возможность наиболее полно использовать перегрузочную характеристику электродвигателя с учетом предшествовавшей нагрузки и температуры окружающей среды. *Наилучшей характеристикой защиты от сверхтоков являлась бы такая, которая проходила бы несколько ниже перегрузочной характеристики* (пунктирная кривая на рис. 18-10).

Защита с тепловым реле. Лучше других могут обеспечивать характеристику, приближающуюся к перегрузочной характеристике электродвигателя, тепловые реле, которые реагируют на количество тепла Q_p , выделенного в сопротивлении

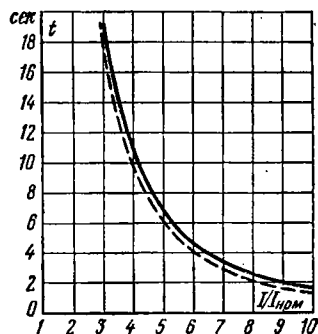


Рис. 18-10. Характеристика зависимости допустимой длительности перегрузки от кратности тока перегрузки.

его нагревательного элемента:

$$Q_p = \left(\frac{I_d}{n_T} \right)^2 rt.$$

Тепло, выделяемое в тепловом реле, пропорционально теплу, выделяемому в электродвигателе, т. е. $Q_p \equiv Q_d$

$$\left(\frac{I_d}{n_T} \right)^2 rt \equiv I_d^2 r_d t.$$

Реле настраивается так, чтобы его уставка срабатывания соответствовала теплу, выделение которого в электродвигателе считается предельно допустимым:

$$Q_{с.р} = Q_{пред. доп.}$$

Наиболее часто тепловые реле выполняются на принципе использования различия в коэффициенте линейного расширения различных металлов под влиянием нагревания. Основой такого теплового реле является биметаллическая пластинка 1 (рис. 18-11), т. е. пластина, состоящая из спаянных по всей поверхности металлов a и b с сильно отличающимися коэффициентами линейного расширения. При нагревании пластинка 1 прогибается в сторону пластины a с меньшим коэффициентом расширения и освобождает защелку рычага 2, который, поворачиваясь, под действием пружины 3 вокруг оси 5 замыкает контакты реле 4.

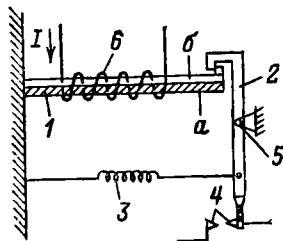


Рис. 18-11. Принцип действия тепловых реле.

Нагревание пластинки 1 осуществляется нагревательным элементом 6 при прохождении по нему тока I . В некоторых конструкциях реле нагревание биметаллической пластинки осуществляется непосредственным пропусканием по ней тока.

Тепловые реле сложны в обслуживании и наладке, имеют различные характеристики отдельных экземпляров реле, часто не соответствуют тепловым характеристикам двигателей и имеют зависимость от температуры окружающей среды, что приводит к нарушению соответствия тепловых характеристик реле и электродвигателя. Поэтому тепловые реле следует применять лишь в тех случаях, когда более простые токовые реле не обеспечивают защиты двигателей.

Защита от перегрузки токовыми реле. Для защиты электродвигателей от перегрузки обычно применяются максимальные токовые защиты с использованием токовых реле с ограниченно зависимыми характеристиками выдержки времени типа РТ-90 или максимальные токовые защиты, выполненные комбинацией мгновенных токовых реле и реле времени (рис. 18-12).

Преимуществами токовых защит по сравнению с тепловыми являются более простая эксплуатация их и более легкий подбор и регулировка характеристик защиты. Однако токовые защиты не позволяют использовать перегрузочные возможности электродвигателей из-за недостаточного времени действия их при малых кратностях тока. Для двигателей, не имеющих технологических перегрузок, этот недостаток не имеет значения, поэтому на собственных нуждах электростанций применяются только токовые защиты.

Защита от перегрузки выполняется одним токовым реле, включенным на один из фазовых токов, или по двухфазной однорелейной схеме (рис. 18-6), когда по этой же схеме выполнена защита от междуфазных к. з.

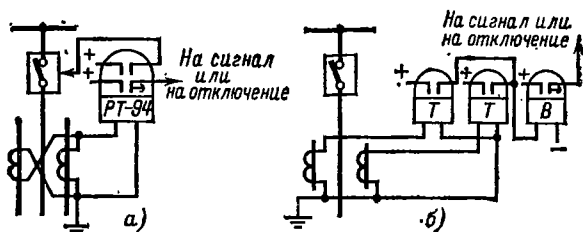


Рис. 18-12. Токовая защита от перегрузки.

а — с реле типа РТ-94; б — с реле типа РТ-40.

В случае выполнения защиты от междуфазных к. з. при помощи токовых реле типа РТ-90 эти же реле используются и для защиты от перегрузки. Если при этом защита от сверхтоков должна действовать не на отключение, а на сигнал, то применяются реле типа РТ-94, имеющие отдельные контакты отсечки и индукционного элемента. Схема защиты в таком исполнении приведена на рис. 18-12, а.

Ток срабатывания максимальной токовой защиты от перегрузки устанавливается из условий отстройки его от номинального тока электродвигателя по выражению

$$I_{с.з} = \frac{k_n}{k_{воз}} I_{ном}. \quad (18-13)$$

Время действия защиты от перегрузки должно быть таким, чтобы оно было больше времени пуска электродвигателя при эксплуатационно возможном понижении напряжения, а у электродвигателей, для которых предусмотрен самозапуск, — больше времени самозапуска. С другой стороны, это время не должно превышать допустимой для двигателя длительности прохождения сверхтока.

Обычно эти условия удовлетворяются, так как первая величина значительно меньше второй.

Время пуска асинхронных электродвигателей обычно составляет 10—15 с. Поэтому характеристика реле типа РТ-90 должна иметь в независимой части время, не меньшее 12—15 с. На защите от перегрузки с независимой характеристикой выдержка времени принимается 12—20 с.

18-7. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ ПОНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Защита минимального напряжения устанавливается на электродвигателях, которые необходимо отключать при понижении напряжения для обеспечения самозапуска ответственных электродвигателей или самозапуск которых при восстановлении напряжения недопустим по условиям техники безопасности или особенностям технологического процесса.

На электростанциях к ответственным относятся такие электродвигатели, отключение которых вызывает снижение нагрузки или остановку станции. К ним относятся электродвигатели питательных, конденсатных и циркуляционных насосов, электродвигатели дымососов, дутьевых вентиляторов и питателей пыли.

Неответственными считаются электродвигатели, отключение которых не отражается на нагрузке станции, например электродвигатели мельниц на станциях с промежуточными бункерами, багерных насосов и т. п.

Если мощность всех ответственных электродвигателей превышает допустимую мощность по условию самозапуска, то при понижении напряжения необходимо отключать и некоторые ответственные электродвигатели.

По истечении времени, достаточного для разворачивания неотключаемых электродвигателей, отключенные ответственные электродвигатели можно включать обратно при помощи АПВ.

Схемы защиты минимального напряжения должны обеспечивать отключение электродвигателей как при полном исчезновении напряжения, так и при длительном коротком замыкании в сети, вызывающем торможение двигателей.

Отключение электродвигателей при исчезновении напряжения обеспечивается установкой одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение (рис. 18-13).

Защита с одним реле напряжения надежно реагирует на трехфазные к. з. Однако при двухфазных к. з. защита с одним реле действует только при к. з. между фазами, на которые включено реле. Так, если реле включено на напряжение U_{AB} (рис. 18-14), то в случае замыкания между фазами B и C напряжение U_{AB} снижается незначительно. Оно составляет $1,5 U_{\phi}$, т. е. уменьшается всего на 15% номинального значения.

Поскольку по условию возврата минимального напряжения уставка на нем не может быть выше 70—80% номинального

напряжения сети, то защита в рассматриваемом случае действовать не будет. Такое же положение имеет место в случае к. з. между фазами *A* и *C*.

Для обеспечения работы защиты при всех случаях двухфазного к. з. иногда применяется трехфазная схема, показанная на рис. 18-15. Эту схему применяют в сетях, где возможно длительное отключение к. з., сопровождаемых снижением напряжения ниже 70%. В сетях, оснащенных быстродействующей защитой или имеющих на линиях реакторы, необходимость в защите, реагирующей на понижение напряжения при к. з. отпадает. Поэтому, как правило, применяется более простая однофазная схема (рис. 18-13).

Существенным недостатком защиты минимального напряжения является возможность ее неправильной работы в случае обрыва цепей напряжения, чаще всего возникающего при перегорании предохранителей в этих цепях. Поэтому защита по схеме рис. 18-13 и 18-15 применима лишь для неответственных электродвигателей.

Во избежание ложного отключения электродви-

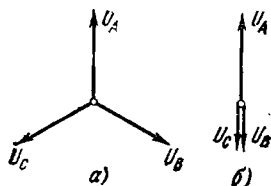


Рис. 18-14. Векторные диаграммы напряжений.
а — нормального режима;
б — при двухфазном к. з. между фазами *B* и *C*.

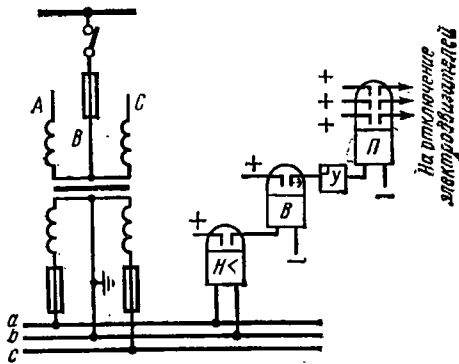


Рис. 18-13. Защита минимального напряжения с одним реле.

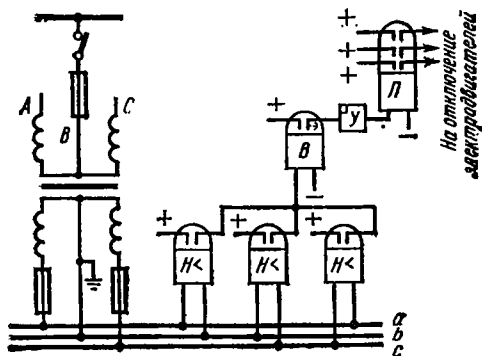


Рис. 18-15. Трехфазная защита минимального напряжения.

гелей при обрыве цепи напряжения в ответственных установках применяются схемы с двумя комплектами реле напряжения, включенными на разные трансформаторы напряжения (рис. 18-16) или разные линейные напряжения одного и того же трансформатора напряжения (рис. 18-17). Контакты реле обоих комплек-

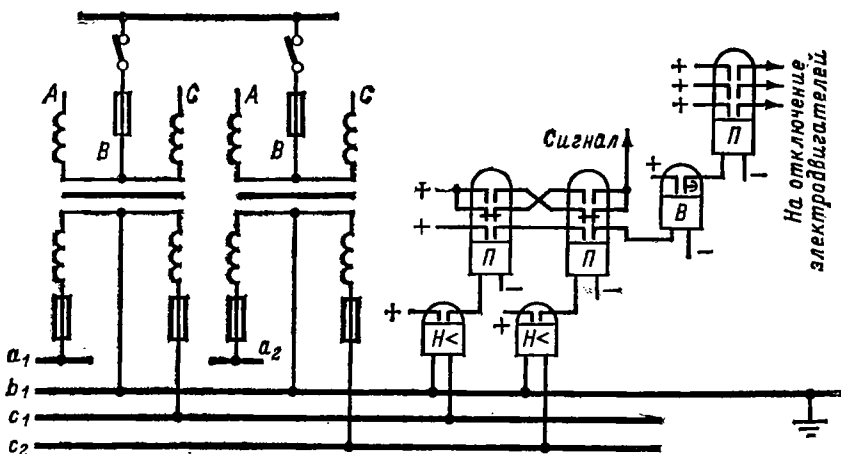


Рис. 18-16. Защита минимального напряжения с двумя реле, питаемыми от разных трансформаторов напряжения.

тов соединяются последовательно. Поэтому при нарушении цепи, питающей один комплект реле, защита не может подать импульс на отключение двигателей.

В случае же исчезновения питающего напряжения защита приходит в действие. В схеме, приведенной на рис. 18-17, действие защиты возможно только при полном исчезновении первичного напряжения или трехфазном коротком замыкании в сети.

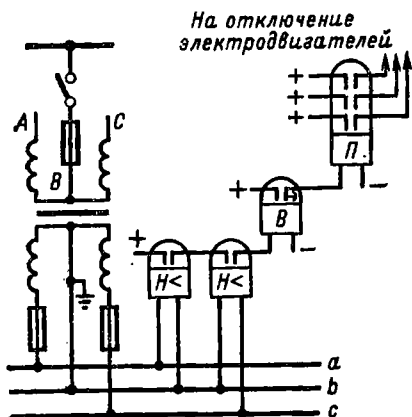


Рис. 18-17. Защита минимального напряжения с двумя реле, питаемыми от разных междуфазных напряжений одного трансформатора напряжения.

Схема с питанием реле от разных трансформаторов напряжения (рис. 18-16) более надежна, поскольку одновременное повреждение цепей двух разных трансформаторов напряжения практически исключено. При включении реле на разные фазы одного трансформатора напряжения имеется возможность одновременного снижения напряжения на обоих реле при обрыве средней фазы цепей напряжения, к которой присоединены оба реле (рис. 18-17).

Для уменьшения вероятности такого обрыва в средней фазе вторичной цепи предохранитель не устанавливается. Кроме того, опасность неправильного действия защиты по схеме на

рис. 18-17 при обрыве одного провода с высокой или низкой стороны трансформатора напряжения устраняется выбором напряжения срабатывания реле защиты меньше 50 % номинального напряжения.

Для экономии аппаратуры защита минимального напряжения часто выполняется в виде групповой защиты, т. е. действующей сразу на группу электродвигателей.

При необходимости отключать от одной защиты минимального напряжения несколько электродвигателей с разными выдержками времени в схеме предусматривается соответствующее количество реле времени.

Например, с первой выдержкой времени 0,5—0,7 с отключается группа электродвигателей для обеспечения самозапуска секции, со второй выдержкой времени порядка 6—10 с защита действует на выключатели электродвигателей, отключение которых необходимо по условиям технологии производства, техники безопасности или для запуска АВР двигателей.

Напряжение срабатывания защиты минимального напряжения выбирается таким, чтобы обеспечивался самозапуск ответственных электродвигателей. Это напряжение определяется путем расчетов или на основании специальных испытаний.

Как указывалось, самозапуск электродвигателей, как правило, обеспечивается при напряжении на шинах порядка 55 % $U_{\text{ном}}$. Поэтому напряжение срабатывания защиты должно иметь величину порядка 60—70 % $U_{\text{ном}}$.

Выдержка времени защиты минимального напряжения определяется ее назначением:

а) Выдержка времени защиты, предназначенной для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей, в целях убыстрения и повышения эффективности самозапуска принимается минимальной и отстраивается только от времени действия мгновенных защит электродвигателей:

$$t = 0,5 \text{ с.}$$

б) Выдержка времени защиты, предназначенной для отключения двигателей по условиям технологии производства и техники безопасности, принимается достаточно большой, с тем чтобы отключение двигателей происходило только при длительной посадке напряжения или его исчезновении:

$$t = 6 \div 10 \text{ с.}$$

18-8. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ НИЖЕ 1000 В

Защита электродвигателей напряжением 500, 380 и 220 В осуществляется, исходя из тех же требований, что и электродвигателей более высоких напряжений.

Для этих электродвигателей применяются: а) мгновенная защита от междуфазных к. з.; б) защита от перегрузки; в) защита минимального напряжения.

Защита от междуфазных к. з. и перегрузки, как и аналогичные защиты электродвигателей высокого напряжения, должна надежно отстраиваться от пусковых токов и токов самозапуска.

Однако часто при небольшой мощности электродвигателей ниже 1 000 В и во многих случаях малоответственных двигателей защиты имеют свои особенности, а именно: а) для них в значительно большей мере применяется защита предохранителями; в ряде других случаев допускаются схемы соединения, при которых отключение к. з. в одном электродвигателе осуществ-

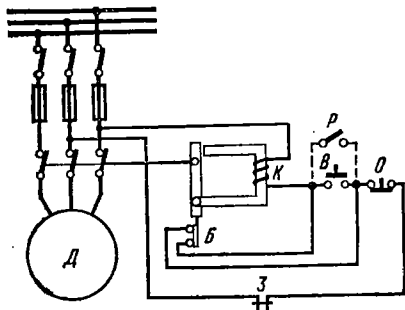


Рис. 18-18. Принцип действия магнитного пускателя.

ляется выключателем, установленным на ответвлении, питающем несколько электродвигателей; для защиты минимального напряжения широкое распространение имеют магнитные пускатели.

Магнитными пускателями называются обычно трехфазные автоматические выключатели низкого напряжения (контакты), рассчитанные на разрыв нормального рабочего тока двигателя и тока его перегрузки. Отключение токов к. з.

при применении магнитного пускателя обычно возлагается на последовательно с ним включаемые предохранители.

Магнитные пускатели (рис. 18-18) в большинстве случаев не имеют защелки и во включенном положении удерживаются действием электромагнита K , обмотка которого подключена на напряжение питания.

Включение магнитного пускателя осуществляется нажатием кнопки B (включение). При этом замыкается цепь обмотки удерживающего электромагнита, якорь которого притягивается и замыкает механически связанные с ним силовые контакты. Кнопка B имеет самовозврат, поэтому после ее размыкания цепь обмотки электромагнита остается замкнутой через вспомогательный контакт B , шунтирующий кнопку B . Для отключения пускателя вручную служит кнопка O (отключение), при нажатии которой разрывается цепь удерживания электромагнита и якорь его, отпадая, размыкает силовые контакты. При понижении напряжения питающей сети электромагнит отпадает и двигатель отключается, чем осуществляется защита минимального напряжения. После восстановления напряжения магнитный пускатель сам включиться не может и включение его должно вновь осуществляться вручную. Для ответственных

электродвигателей это является существенным недостатком. Для его устранения кнопка B шунтируется ключом или рубильником P (показан пунктиром). При замкнутом рубильнике после восстановления напряжения электромагнит пускателя вновь притягивает якорь и включает двигатель, так как цепь его обмотки остается замкнутой.

При необходимости осуществить на электродвигателе, помимо предохранителей, защиту от перегрузки последовательно в цепь самоудерживания электромагнита вводится выходной контакт защиты $З$. Для защиты от перегрузки электродвигателей низкого напряжения, управляемых контакторами, допускается применение тепловых реле. Магнитный пускатель, являющийся по принципу индивидуальной защитой электродвигателя, весьма прост в эксплуатации.

18-9. РАСЧЕТ ТОКОВ САМОЗАПУСКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОСТАТОЧНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА ИХ ЗАЖИМАХ

а) Общие положения

Расчет самозапуска необходим для выбора уставок защит источников питания, а также для определения предельной мощности самозапускающихся электродвигателей. Задача расчета сводится к определению суммарного тока самозапуска электродвигателей I_{Σ} и остаточного напряжения на их зажимах $U_{ост}$.

Расчет самозапуска выполняется для наиболее тяжелого режима при остановленных электродвигателях ($s = 1$).

б) Расчет самозапуска электродвигателей

Ниже рассмотрен расчет самозапуска остановленных электродвигателей при питании их от шин источника «бесконечной мощности» через трансформатор или реактор.

Расчет самозапуска от генератора, мощность которого соизмерима с мощностью самозапускающихся электродвигателей, более сложен.

Целью расчета является определение суммарного тока двигателей и остаточного напряжения на их зажимах при самозапуске.

Как было указано выше, ток в момент пуска или самозапуска отдельного электродвигателя равен току трехполюсного к. з. за сопротивлением остановленного двигателя.

При самозапуске группы электродвигателей (рис. 18-19) их результирующее сопротивление $z_{p.д}$ находится путем параллельного сложения сопротивлений электродвигателей, участвующих в самозапуске:

$$\frac{1}{z_{p.д}} = \frac{1}{z_{д1}} + \frac{1}{z_{д2}} + \dots + \frac{1}{z_{дn}}.$$

Величины сопротивлений отдельных заторможенных электродвигателей определяются по выражению

$$z_d = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{п.пуск}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение двигателя; $I_{\text{п.пуск}}$ — начальное значение периодической составляющей пускового тока двигателя при $U_{\text{ном}}$.

Значение периодической составляющей пускового тока $I_{\text{п.пуск}}$ определяется или по паспортным данным, или практически, путем осциллографирования тока при пуске двигателя.

При питании шин двигателя от трансформатора все сопротивления и расчетное напряжение приводятся к одной ступени напряжения по формулам

$$z' = zn_T^2 = z \frac{U_2^2}{U_1^2};$$

$$U'_{\text{расч}} = U_{\text{расч}} n_T,$$

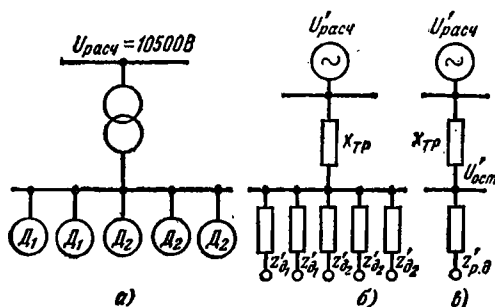


Рис. 18-19. Расчетные схемы для определения токов и напряжения при самозапуске двигателей.

а — схема питания электродвигателей; б — расчетная схема замещения; в — расчетная схема замещения после преобразования.

сторону, к которой осуществляется приведение; U_1 — то же на стороне, с которой осуществляется приведение; $U_{\text{расч}}$ — расчетное напряжение (линейное); $U'_{\text{расч}}$ — приведенное значение расчетного напряжения.

Ток самозапуска электродвигателей, питающихся через трансформатор или реактор

$$I_{\text{п}\Sigma} = \frac{U'_{\text{расч}}}{\sqrt{3} (x + z'_{\text{р.д}})},$$

где $I_{\text{п}\Sigma}$ — ток самозапуска группы двигателей; x — сопротивление трансформатора или реактора; $z'_{\text{р.д}}$ — результирующее пусковое сопротивление группы электродвигателей, приведенное к расчетной ступени напряжения.

Для упрощения расчета полное сопротивление заторможенных электродвигателей и реактивное сопротивление трансформатора или реактора складываются арифметически.

Падение напряжения на сопротивлениях схемы замещения пропорционально величинам соответствующих сопротивлений.

Отсюда может быть определено остаточное напряжение на зажимах двигателей при самозапуске:

$$U'_{\text{ост}} = U'_{\text{расч}} \frac{z'_{\text{р.д}}}{x + z'_{\text{р.д}}},$$

где $U'_{\text{ост}}$ — остаточное напряжение на зажимах двигателя, приведенное к расчетной ступени напряжения.

в) Пример расчета самозапуска электродвигателей

1. Расчетные условия. Рассчитать начальные условия самозапуска группы электродвигателей от шин бесконечной мощности 10 500 В через трансформатор (рис. 18-19).

Параметры электродвигателей D_1 : $P_{ном1} = 2000$ кВт, $\cos \varphi_{ном} = 0,85$; $U_{ном} = 3000$ В; $k_{п.п1} = 5,5$.

Параметры электродвигателей D_2 : $P_{ном2} = 875$ кВт, $\cos \varphi_{ном2} = 0,85$; $U_{ном2} = 3000$ В; $k_{п.п2} = 5$ ($k_{п.п1}$ и $k_{п.п2}$ — кратности пусковых токов электродвигателей D_1 и D_2 соответственно).

Параметры трансформатора: $S_{тр} = 7500$ кВ·А; $e_k = 8\%$; $n_{тр} = \frac{10\,500}{3300}$.

2. Определяются расчетные сопротивления, приведенные к напряжению 3300 В.

Сопротивление трансформатора

$$x_{тр} = \frac{e_k}{100} \frac{U_{ном}^2 (\text{кВ})}{S_{тр} (\text{МВ} \cdot \text{А})} = \frac{8 \cdot 3,3^2}{100 \cdot 7,5} = 0,116 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток электродвигателя D_1

$$I_{ном1} = \frac{S_{ном1}}{\sqrt{3} U_{ном1} \cos \varphi_{ном1}} = \frac{2\,000\,000}{\sqrt{3} \cdot 3000 \cdot 0,85} = 454 \text{ А.}$$

Пусковое сопротивление электродвигателя D_1

$$z'_{д1} = \frac{U_{ном1}}{\sqrt{3} I_{пуск1}} = \frac{U_{ном1}}{\sqrt{3} k_{п.п1} I_{ном1}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 5,5 \cdot 454} = 0,69 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление двух электродвигателей D_1

$$z'_{д1} = \frac{z_{д1}}{2} = \frac{0,69}{2} = 0,345 \text{ Ом.}$$

Номинальный ток электродвигателя D_2

$$I_{ном2} = \frac{S_{ном2}}{\sqrt{3} U_{ном2} \cos \varphi_{ном2}} = \frac{875\,000}{\sqrt{3} \cdot 3000 \cdot 0,85} = 198 \text{ А.}$$

Пусковое сопротивление электродвигателя D_2

$$z'_{д2} = \frac{U_{ном2}}{\sqrt{3} I_{пуск2}} = \frac{U_{ном2}}{\sqrt{3} k_{п.п2} I_{ном2}} = \frac{3000}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 198} = 175 \text{ Ом.}$$

Суммарное сопротивление трех электродвигателей D_2

$$z'_{д2} = \frac{z_{д2}}{3} = \frac{1,75}{3} = 0,583 \text{ Ом.}$$

Резльтирующее пусковое сопротивление всех электродвигателей

$$z'_{р.д} = \frac{z'_{д1} z'_{д2}}{z'_{д1} + z'_{д2}} = \frac{0,345 \cdot 0,583}{0,345 + 0,583} = 0,217 \text{ Ом.}$$

3. Расчетное напряжение, приведенное к стороне низшего напряжения трансформатора,

$$U'_{расч} = U_{расч} \frac{3300}{10\,500} = 10\,500 \frac{3300}{10\,500} = 3\,300 \text{ В.}$$

4. Ток самозапуска электродвигателей

$$I_{п\Sigma} = \frac{U'_{расч}}{\sqrt{3} (x_{тр} + z'_{р.д})} = \frac{3\,300}{\sqrt{3} (0,116 + 0,217)} = 5730 \text{ А.}$$

Ток самозапуска электродвигателей, приведенный к стороне высшего напряжения трансформатора:

$$I_{\Sigma 10,5} = \frac{I_{\Sigma}}{n_{\text{тр}}} = 5730 \frac{3300}{10\,500} = 1\,800 \text{ А.}$$

5. Остаточное напряжение на зажимах электродвигателей

$$U_{\text{ост}} = U'_{\text{расч}} \frac{z_{\text{р.д}}}{x_{\text{тр}} + z_{\text{р.д}}} = 3300 \frac{0,217}{0,116 + 0,217} = 2150 \text{ В,}$$

что составляет:

$$\frac{2150}{3000} 100 = 72\% \text{ номинального напряжения.}$$

В ы в о д. Самозапуск электродвигателей обеспечивается.

18-10. ЗАЩИТА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

а) Некоторые особенности синхронных электродвигателей

При рассмотрении защиты синхронных электродвигателей необходимо учитывать их особенности.

Отметим наиболее важные из них:

1. Пуск большинства синхронных электродвигателей производится при отсутствии возбуждения прямым включением в сеть. Для этой цели на роторе синхронного электродвигателя предусматривается дополнительная короткозамкнутая обмотка, выполняющая во время пуска ту же роль, что и в короткозамкнутом асинхронном электродвигателе. Когда скольжение двигателя приближается к нулю, включается возбуждение и электродвигатель втягивается в синхронизм под влиянием появляющегося при этом синхронного момента.

Во время пуска синхронный электродвигатель потребляет из сети повышенный ток, который по мере уменьшения скольжения затухает, так же как и у асинхронного электродвигателя.

Для уменьшения понижения напряжения и величины пусковых токов мощные синхронные электродвигатели пускаются через реактор, который затем шунтируется. Защиты синхронных электродвигателей, как и защиты асинхронных электродвигателей, должны быть отстроены от токов, возникающих при их пуске или самозапуске, имеющих место при восстановлении напряжения в сети.

2. Момент синхронного электродвигателя зависит от напряжения сети U_d , э. д. с. электродвигателя E_d и угла сдвига δ между U_d и E_d . Без учета потерь в статоре и роторе

$$M_d = k \left(\frac{E_d U_d}{x_d} + U_d^2 \frac{x_d - x_q}{2x_d x_q} \sin \delta \right), \quad (18-14)$$

где x_d и x_q — продольное и поперечное реактивные сопротивления двигателя.

При постоянных значениях U_d и E_d каждой нагрузке электродвигателя соответствует определенное значение угла δ .

В случае понижения напряжения в сети, как следует из выражения (18-14), момент M_d уменьшается. Если при этом он окажется меньше момента сопротивления M_c механизма, то устойчивая работа синхронного электродвигателя нарушается, возникают качания и электродвигатель выходит из синхронизма. Нарушение устойчивости возможно также при перегрузке электродвигателя или снижении возбуждения.

Эффективным средством повышения устойчивости электродвигателя является форсировка возбуждения, увеличивающая E_d . Опыт показывает, что при глубоких понижениях напряжения (до нуля) синхронные электродвигатели, работающие с номинальной нагрузкой, выходят из синхронизма, если перерыв питания превосходит 0,5 с.

При нарушении синхронизма скорость вращения электродвигателя уменьшается и он переходит в асинхронный режим. При этом в пусковой обмотке и цепи ротора появляются токи, создающие дополнительный асинхронный момент, под влиянием которого синхронный электродвигатель может остаться в работе с некоторым скольжением. На асинхронный момент электродвигателя накладывается момент, обусловленный током возбуждения в роторе, имеющий переменный знак. Поэтому результирующий момент электродвигателя имеет переменную величину, что вызывает колебания скорости вращения ротора и тока статора двигателя.

Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке электродвигателя при асинхронном режиме, вызывают повышенный нагрев их, поэтому длительная работа синхронных электродвигателей в асинхронном режиме с нагрузкой больше 0,4—0,5 номинальной недопустима.

В связи с этим появляется необходимость в специальной защите от асинхронного режима. Защита от асинхронного режима должна или осуществить ресинхронизацию электродвигателя, или отключить его. Ресинхронизация состоит в том, что с электродвигателя снимается возбуждение (при этом его асинхронный момент повышается и скольжение уменьшается), через некоторое время включается возбуждение и двигатель вновь втягивается в синхронизм. Признаком нарушения синхронизма электродвигателя является появление колебаний тока в статоре и переменного тока в роторе.

3. Исследования и опыт эксплуатации показывают, что после отключения к. з. или включения резервного источника питания многие синхронные электродвигатели могут самозапускаться, т. е. вновь (сами) втягиваться в синхронизм.

Самозапуск синхронных электродвигателей возможен, если после восстановления напряжения под влиянием возросшего асинхронного момента (пропорционально U_d^2) скольжение эле-

ктродвигателя настолько уменьшится, что он сможет снова втянуться в синхронизм.

Возможность самозапуска зависит от параметров электродвигателя, его нагрузки и уровня напряжения.

Ввиду большого значения самозапуска синхронных электродвигателей их защиты должны надежно отстраиваться от токов, возникающих в режиме самозапуска.

б) Защиты, применяемые на синхронных электродвигателях

На синхронных электродвигателях устанавливаются следующие защиты:

- а) от междуфазных повреждений в статоре;
- б) от замыканий обмотки статора на землю;
- в) от перегрузки;
- г) от асинхронного режима;
- д) от понижения напряжения.

Защита от междуфазных повреждений является основной и обязательной защитой любого синхронного двигателя. Она выполняется мгновенной в виде токовой отсечки или продольной дифференциальной защиты по такой же схеме, как и у асинхронных электродвигателей. Отличие заключается только в том, что защита синхронного электродвигателя одновременно с выключателем отключает АГП. Ток срабатывания отсечки отстраивается от пусковых токов и токов самозапуска электродвигателя. При этом в случае прямого пуска синхронного электродвигателя от сети пусковые токи его за счет меньшего реактивного сопротивления часто получаются большими, чем у равновеликих по мощности асинхронных двигателей.

Крупные синхронные электродвигатели оборудуются обычно продольной дифференциальной защитой. В целях упрощения на электродвигателях до 5 000 кВ·А дифференциальную защиту выполняют двухфазной. На более мощных электродвигателях защиту устанавливают на трех фазах, что позволяет обеспечить быстрое отключение электродвигателя при двойном замыкании на землю (одно в электродвигателе и второе в сети.)

Защита от замыканий обмотки статора электродвигателя на землю применяется при токах замыкания на землю больше 10 А. Защита выполняется с действием на отключение таким же образом, как у асинхронных электродвигателей, и поэтому в данном разделе подробнее не рассматривается.

Защита электродвигателя от перегрузки осуществляется при помощи токового реле, включенного в одну фазу. При наличии постоянного дежурного персонала защита может выполняться с действием на сигнал с $I_{с.з} = 1,25 I_{ном}$ и выдержкой времени, превышающей по возможно-

сти время затухания пусковых токов. При отсутствии дежурного персонала защиту от перегрузки рекомендуется выполнять двумя комплектами, один из которых действует на сигнал, а второй, более грубый — на отключение. Сигнал о перегрузке подается для вызова персонала, который должен прийти в помещение, где находится электродвигатель, и принять меры по его разгрузке. Отключающий комплект выполняется с $I_{с.з} = (1,5 \div 1,75) I_{ном}$ и выдержкой времени, отстроенной от пусковых токов. На электродвигателях с частыми перегрузками может применяться защита с тепловыми реле, действующими на отключение. Однако тепловые реле следует использовать только в крайних случаях ввиду их относительной сложности и только при условии надежности конструкции и достаточной стабильности характеристики.

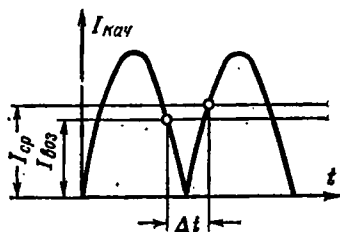


Рис. 18-20. Изменение тока статора синхронного двигателя при асинхронном режиме.

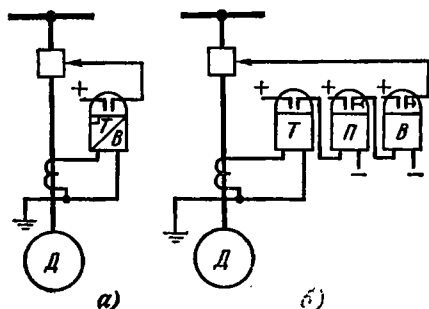


Рис. 18-21. Защита синхронного двигателя от асинхронного режима.

Защита от асинхронного режима выполняется реагирующей на колебания тока в статоре или роторе двигателя, возникающие в этом режиме (рис. 18-20).

Самой простой защитой является токовая (рис. 18-21). Она выполняется при помощи зависимого токового реле (рис. 18-21, а) или посредством мгновенного токового реле, действующего на вспомогательное промежуточное реле с замедленным размыканием контактов (рис. 18-21, б). Действие этой защиты основано на том, что она не успевает возвратиться за время Δt спада тока между циклами качаний (рис. 18-20) и постепенно, за несколько периодов качаний набирает время и срабатывает на отключение. Ток срабатывания такой защиты (имеется в виду наименьший ток качаний, при котором защита замыкает цепь отключения) определяется не только уставкой на реле, но и зависит от продолжительного периода качаний. Для надежной работы защиты время возврата $t_{воз}$ (подвижной системы токового реле в схеме на рис. 18-21, а или якоря промежуточного реле в схеме на рис. 18-21, б) должно быть больше времени

Δt (рис. 18-20), в течение которого ток качаний недостаточен для действия реле, т. е. $t_{\text{воз}} > \Delta t$. Выдержка времени защиты выбирается больше времени затухания пусковых токов двигателя.

Для выполнения рассматриваемой защиты применяется реле РТ-80 и РТ-90.

Более совершенной по своему принципу является защита, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора, выполняемая по схеме на рис. 18-22. Нормально в цепи ротора проходит постоянный ток, и защита не действует, так как ток во вторичной обмотке трансформатора тока отсутствует. При качаниях в роторе индуцируется переменный ток, под влиянием

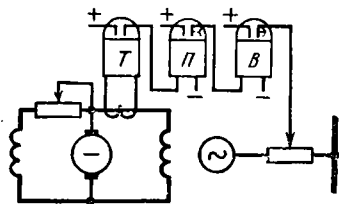


Рис. 18-22. Защита синхронного электродвигателя от асинхронного режима, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора.

индуцируют переменный ложное действие защиты.

Вместо трансформатора тока в схеме на рис. 18-22 можно включить дроссель, к зажимам которого подключается токовое реле *Т*. Спротивление дросселя при постоянном токе ничтожно, и поэтому напряжение на его зажимах близко к нулю и ток в реле *Т* отсутствует. При переменном токе на зажимах дросселя появляется напряжение, достаточное для действия реле *Т*.

Защита от понижения напряжения является вспомогательной и устанавливается только в следующих случаях:

- 1) на электродвигателях неотчетливых механизмов для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей;
- 2) на электродвигателях, самозапуск которых оказывается невозможным;
- 3) на электродвигателях ответственных механизмов, произвольный самозапуск которых недопустим по условиям технологии производства или техники безопасности.

Схема защиты выполняется так же, как и асинхронных электродвигателей и синхронных компенсаторов. Уставки защиты зависят от ее назначения. На защитах, установленных для обеспечения самозапуска ответственных электродвигателей, напряже-

ние срабатывания берется равным уровню напряжения, при котором обеспечивается надежный самозапуск, т. е.

$$U_{с.з} = (0,5 \div 0,7) U_{ном.}$$

Выдержка времени в этом случае отстраивается от мгновенно действующих защит в сети и принимается равной 0,5 с.

На электродвигателях, самозапуск которых невозможен, напряжение срабатывания берется равным $0,5U_{ном.}$, исходя из того, что двигатели, работающие с полной нагрузкой, могут выйти из синхронизма при понижении напряжения в сети на 50% или ниже. Выдержка времени, как и в предыдущем случае, принимается равной 0,5 с. На защитах, отключающих электродвигатели по условиям технологии или техники безопасности, напряжение срабатывания выбирается также по уровню, опасному по условиям устойчивости, т. е. $U_{с.з} = 0,5U_{ном.}$, а время — максимальным по условию выбега (остановки) электродвигателя (больше времени остановки).

ГЛАВА ДЕВЯТНАДЦАТАЯ

ЗАЩИТА СБОРНЫХ ШИН

19-1. ВИДЫ ЗАЩИТ ШИН И ТРЕБОВАНИЯ К НИМ

Опыт эксплуатации показывает, что, несмотря на благоприятные условия для надзора и ухода за элементами распределительных устройств электростанций и подстанций, повреждения на их шинах все же имеют место. К числу наиболее характерных причин, вызывающих к. з. на шинах, следует отнести: перекрытие шинных изоляторов и вводов выключателей; повреждение трансформаторов напряжения и установленных между шинами и выключателями трансформаторов тока; поломка изоляторов разъединителей и воздушных выключателей во время операций с ними; ошибка обслуживающего персонала при переключениях в распределительных устройствах.

Для отключения к. з., возникающих на шинах электростанций и подстанций, на питающих шины генераторах, трансформаторах и линиях, обычно предусматриваются соответствующие защиты. В качестве таких защит на генераторах и трансформаторах служат защиты от внешних к. з., а на линиях — максимальные или дистанционные защиты, однако эти защиты работают при к. з. на шинах с выдержкой времени, имеющей иногда значительную величину.

В то же время по условиям устойчивости, особенно в сетях 110—500 кВ, обычно требуется мгновенное отключение междуфазных к. з. на шинах. В таких случаях появляется необходи-

мость в применении специальных защит шин, способных отключать повреждения на них без выдержки времени.

Кроме недостаточной быстроты действия, защиты линий, трансформаторов и генераторов в некоторых случаях не могут обеспечить селективного отключения поврежденной системы шин.

Характерным примером этого может служить подстанция с двумя выключателями на каждом присоединении (рис. 19-1). При к. з., например, на первой системе шин защиты 1 и 2 отключают соответственно выключатели В-1 и В-2, лишив питания обе системы шин, хотя при данной схеме соединений имеется воз-

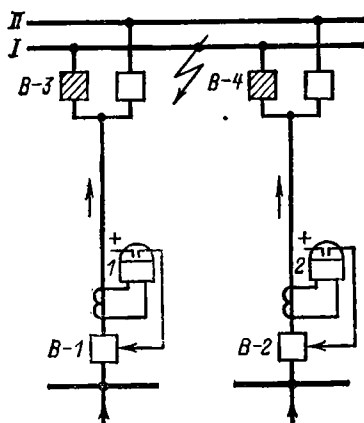


Рис. 19-1. Схема подстанции с двумя выключателями на каждом присоединении. Выключатели, отключаемые защитой при к. з. на первой (I) системе шин, заштрихованы.

можность сохранить в работе всю подстанцию, отключив выключатели В-3 и В-4. Такая ликвидация повреждения может быть обеспечена с помощью специальной защиты шин.

Таким образом, специальные защиты шин применяются в тех случаях, когда защита присоединений не в состоянии обеспечить необходимого быстрого действия или селективности.

Для прекращения к. з. на шинах их защита должна действовать на отключение всех присоединений, питающих шины. В связи с этим специальные защиты шин приобретают особую ответственность, так как их неправильное действие приводит к отключению целой электростанции или подстанции либо их секции. Поэтому

принцип действия защит шин и их практическое выполнение (монтаж) должны отличаться повышенной надежностью, исключаящей какую-либо возможность их ложного действия.

В настоящее время в качестве быстродействующей и селективной защиты шин получила повсеместное распространение защита, основанная на дифференциальном принципе. На трансформаторах и секционных выключателях, питающих шины, у которых отходящие линии имеют реакторы, в качестве специальной защиты шин применяются токовые отсечки и дистанционные защиты.

В последнее время быстрое отключение к. з. на шинах сочетается с автоматическим повторным включением шин (АПВ). Опыт эксплуатации показывает, что некоторая часть к. з. на шинах имеет переходящий характер и при быстром отключении не восстанавливается после повторного включения.

19-2. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН

Д и ф ф е р е н ц и а л ь н а я з а щ и т а ш и н (рис. 19-2) основывается на том же принципе, что и рассмотренные ранее дифференциальные защиты генераторов, трансформаторов и линий, т. е. на сравнении величины и фазы токов, приходящих к защищаемому элементу и уходящих от него.

Для питания защиты на всех присоединениях устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации n_T (независимо от мощности присоединения).

Дифференциальное реле 1 подключается к трансформаторам тока всех присоединений, так чтобы при первичных токах, направленных к шинам, в нем проходил ток, равный сумме токов всех присоединений, т. е. $I_p = \Sigma I_{\text{прис.}}$. Тогда при внешних к. з. $\Sigma I_{\text{прис.}} = 0$ и реле не действует, а при к. з. в зоне (на шинах) $\Sigma I_{\text{прис.}}$ равна сумме токов к. з., притекающих к месту повреждения, и защита работает.

Обычно первичные обмотки всех трансформаторов тока подключаются к шинам одноименными зажимами (рис. 19-2); при этом для выполнения указанного включения реле 1 все вторичные обмотки трансформаторов тока соединяются параллельно одноименной полярностью (начало — с началом, конец — с концом) и параллельно к ним подключается обмотка реле 1.

П р и в н е ш н е м к. з. (точка K на рис. 19-2) ток к. з. I_4 , идущий от шин к месту к. з. по поврежденной линии $Л4$, равен сумме токов, притекающих к шинам от источников питания:

$$I_4 = I_1 + I_2 + I_3. \quad (19-1)$$

Из токораспределения, показанного на рис. 19-2, видно, что вторичные токи $I_{1в}$, $I_{2в}$ и $I_{3в}$, соответствующие первичным токам, притекающим к шинам, направлены в обмотке реле противоположно току $I_{4в}$ (первичный ток которого утекает от шин). Ток в реле

$$I_p = (I_{1в} + I_{2в} + I_{3в}) - I_{4в}. \quad (19-2)$$

Выражая вторичные токи через первичные и учитывая равенство (19-1), получаем, что ток

$$I_p = \frac{I_1}{n_T} + \frac{I_2}{n_T} + \frac{I_3}{n_T} - \frac{I_4}{n_T} = 0.$$

Следовательно, при внешних к. з. ток в реле отсутствует.

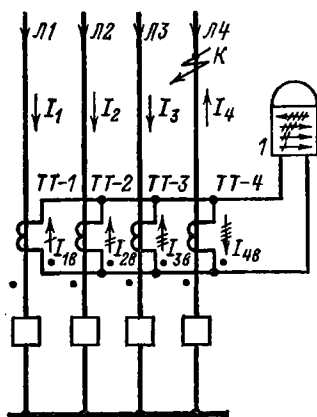


Рис. 19-2. Токораспределение во вторичных цепях дифференциальной защиты шин при внешних к. з.

С учетом токов намагничивания вторичные токи трансформаторов тока равны:

$$\begin{aligned} i_{1в} &= \frac{i_1}{n_T} - i_{\text{нам}1}; \\ i_{2в} &= \frac{i_2}{n_T} - i_{\text{нам}2} \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Подставив эти значения вторичных токов в выражение (19-2), найдем:

$$I_p = i_{\text{нам}4} - (i_{\text{нам}1} + i_{\text{нам}2} + i_{\text{нам}3}) = i_{\text{нб}}. \quad (19-3)$$

Полученное выражение позволяет сделать вывод, что вследствие погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса $I_{\text{нб}}$, равный геометрической разности токов намагничивания трансформаторов

тока на поврежденном присоединении $Л4$ и трансформаторов тока всех остальных присоединений ($Л1$, $Л2$, $Л3$), по которым ток к. з. притекает к шинам.

В общем случае

$$\begin{aligned} i_{\text{нб}} &= i_{\text{нам, повр. пр}} - \\ &- \sum i_{\text{нам, неповр. пр.}} \quad (19-3a) \end{aligned}$$

Защита не будет действовать при условии, что ток срабатывания реле будет больше максимального тока небаланса:

$$I_{\text{с.р}} > I_{\text{нб, макс.}}$$

Рис. 19-3. Токораспределение во вторичных цепях дифференциальной защиты шин при к. з. на шинах.

При к. з. на шинах (рис. 19-3) по всем присоединениям, имеющим источники питания (генераторы), ток к. з. направляется к месту повреждения, т. е. к шинам подстанции. Вторичные токи направлены в обмотке реле одинаково, поэтому ток в реле равен их сумме: $I_p = I_{1в} + I_{2в} + I_{3в} + I_{4в}$.

Выражая вторичные токи через первичные, получаем:

$$i_p = \frac{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}{n_T}.$$

Так как

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_4 = i_K, \quad (19-4)$$

то

$$I_p = \frac{I_K}{n_T}. \quad (19-5)$$

Выражение (19-5) показывает, что при к. з. на шинах дифференциальная защита шин реагирует на полный ток I_K в месте к. з. и благодаря этому имеет наиболее благоприятные условия в отношении чувствительности. Защита будет действовать, если

$$I_K > I_{с.з.}$$

В нормальном режиме по части присоединений токи направлены к шинам, а по другой части — от шин. Сумма токов, приходящих к шинам, всегда равна сумме токов, уходящих от них: $\Sigma I_{\text{прих}} = \Sigma I_{\text{уход}}$.

В обмотке реле приходящие и уходящие токи направлены встречно, поэтому ток в реле

$$I_p = \sum \frac{I_{\text{прих}}}{n_T} - \sum \frac{I_{\text{уход}}}{n_T} = 0.$$

Но из-за погрешности трансформаторов тока в реле появляется ток небаланса. Поскольку токи нагрузки меньше токов к. з., величина тока небаланса в нормальном режиме значительно меньше, чем при внешнем к. з.

19-3. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН

а) Уменьшение токов небаланса

Ток небаланса может вызвать неправильную работу защиты, поэтому принимаются меры к ограничению его величины.

Выражения (19-3) и (19-3а) показывают, что для уменьшения тока небаланса необходимо уменьшить разность между намагничивающим током $I_{4\text{нам}}$ трансформаторов тока на поврежденном присоединении, по которому проходит наибольший ток к. з., и суммой намагничивающих токов $I_{1\text{нам}} + I_{2\text{нам}} + I_{3\text{нам}}$ остальных присоединений. При равенстве обеих составляющих ток небаланса отсутствует.

Как известно, ток намагничивания трансформаторов тока зависит от величины его вторичной э. д. с. E_2 . Их взаимная связь $E_2 = f(I_{\text{нам}})$ характеризуется кривой намагничивания (рис. 19-4).

Чем больше ток к. з., проходящий через трансформаторы тока, тем больше будет E_2 , а следовательно, и ток $I_{\text{нам}}$. При внешнем к. з. наибольший ток к. з. проходит через трансформатор тока поврежденного присоединения, поэтому его ток намагничивания и погрешность будут максимальными. По трансформаторам тока остальных присоединений проходит лишь часть этого тока, благодаря чему их токи намагничивания значительно меньше. Особенно неблагоприятным является такое соотношение вторичных э. д. с., при котором трансформаторы тока поврежденного присоединения работают в насыщенной части (точка 4 на рис. 19-4), а все остальные — в прямолинейной части характеристики намагничивания

(точки 1, 2 и 3). При этих условиях разница токов намагничивания в выражении (19-3) имеет наибольшую величину. Поэтому для уменьшения небаланса нужно обеспечить условия, при которых все трансформаторы тока работают при внешних к. з. в ненасыщенной части характеристики. С этой целью необходимо:

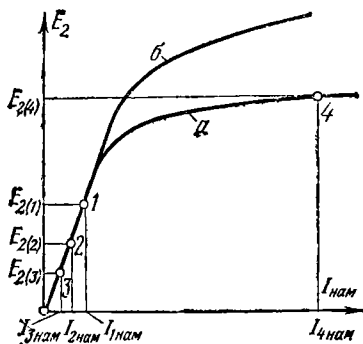


Рис. 19-4. Характеристика намагничивания трансформаторов тока дифференциальной защиты.

сечения и сокращения длины соединительных проводов, а второе — применением одноамперных трансформаторов тока или вспомогательных трансформаторов, понижающих ток в соединительных проводах.

Выбор трансформаторов тока и определение допустимой нагрузки z_n на них производится по кривым предельной кратности токов при 10%-ной погрешности.

б) Отстройка дифференциальных реле от тока небаланса

Хотя перечисленные выше мероприятия по снижению небаланса имеют существенное значение, в неустановившемся режиме токи небаланса все же могут достигать больших значений за счет влияния аperiodической составляющей тока к. з., сильно намагничивающей сердечник трансформаторов тока.

Для улучшения отстройки от повышенных токов небаланса в неустановившемся режиме в дифференциальной защите шин, так же как и в других дифференциальных защитах, применяются реле с быстронасыщающимися трансформаторами тока 5 (рис. 19-5). Последние не пропускают в реле аperiodическую составляющую тока небаланса, вследствие чего дифференциальная защита отстраивается не от полного тока небаланса, а только от его периодической составляющей. Защита выполняется с помощью реле РНТ-567 со встроенным БНТ. Реле имеет две независимые рабочие обмотки w_1 и w_2 , выполняется в двух модификациях — на 5 А и 1 А вторичного номинального тока.

а) применять однотипные трансформаторы тока, у которых насыщение происходит при возможно больших токах I_k ; наилучшими с этой точки зрения являются трансформаторы тока класса Р(Д), которые и рекомендуется применять для защиты шин;

б) уменьшать кратность тока I_k к номинальному току трансформаторов тока, увеличивая их коэффициент трансформации n_t ;

в) уменьшать нагрузку на трансформаторы тока, уменьшая z_n и вторичный ток I_v ; первое достигается за счет увеличения

в) Контроль за исправностью токовых цепей

В случае обрыва или шунтирования фазы вторичной цепи трансформатора тока какого-нибудь присоединения ток от оборванной или зашунтированной фазы не поступает в дифференциальные реле. В результате этого баланс токов в реле нарушается, в них появляется избыточный ток, равный по величине и противоположный по направлению току оборванной или зашунтированной фазы.

Таким образом, при обрыве токовой цепи защита шин может неправильно сработать и отключить всю подстанцию или электростанцию, т. е. вызвать тяжелую аварию.

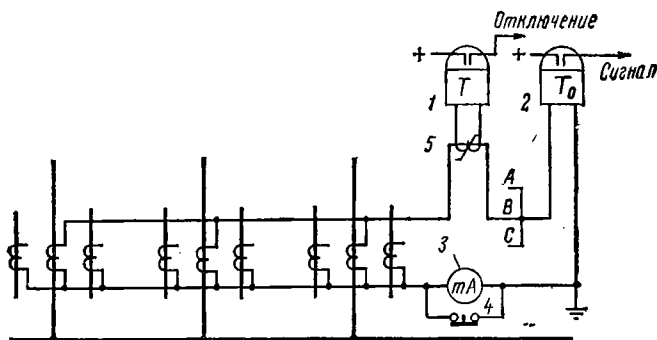


Рис. 19-5. Дифференциальная защита с реле 1, включенным через быстронасыщающийся трансформатор 5, и с контролем исправности токовых цепей при помощи сигнального реле 2 и миллиамперметра 3.

Для предупреждения неправильной работы защиты под влиянием тока нагрузки оборванной фазы дифференциальные реле отстраиваются от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения.

Кроме того, в нулевом проводе дифференциальных реле устанавливается чувствительное токовое реле 2 (рис. 19-5).

При обрыве или шунтировании фазы вторичной цепи реле 2 с выдержкой времени выводит защиту из действия и подает предупредительный сигнал.

Реле 2 дополняется миллиамперметром 3, при помощи которого можно обнаружить не только обрыв, но и ухудшение контакта в цепи какой-нибудь фазы или витковое замыкание в трансформаторе тока, вызывающее увеличение тока небаланса в нулевом проводе. Нажимая кнопку 4, дежурный периодически измеряет ток небаланса, проверяя, таким образом, исправность токовой цепи.

19-4. ТОК СРАБАТЫВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН С РЕЛЕ, ВКЛЮЧЕННЫМИ ЧЕРЕЗ БНТ [Л. 4]

Ток срабатывания выбирается, исходя из двух условий:

1. Защита не должна действовать при обрыве вторичной токовой цепи в нормальном режиме; для этого

$$I_{с.з} = k_n I_{н.макс}, \quad (19-6)$$

где k_n — коэффициент запаса, принимаемый равным 1,2—1,25; $I_{н.макс}$ — максимальный ток нагрузки наиболее загруженного присоединения.

2. Защита не должна действовать от токов небаланса при внешних к. з., для этого

$$I_{с.з} = k_n I_{нб.макс}. \quad (19-7)$$

При включении реле через насыщающийся трансформатор ток срабатывания отстраивается от тока небаланса в установившемся режиме.

Величина установившегося $I_{нб.макс}$ оценивается приближенно. Предполагается, что работает с погрешностью только трансформатор тока, по которому проходит суммарный ток к. з. При этом условии ток небаланса будет равен погрешности ε этого трансформатора тока, которая в свою очередь равна его току намагничивания $I_{нам}$:

$$I_{нб} = \varepsilon = I_{нам}.$$

Если ε при максимальном значении тока к. з. не превышает 10%, что проверяется по кривым 10%-ных погрешностей, то

$$I_{нб.макс} = 0,1 I_{к.макс}, \quad (19-8)$$

где $I_{к.макс}$ — наибольший ток к. з. при внешних повреждениях.

Окончательно ток срабатывания принимается равным большему из двух полученных значений (19-6) и (19-7).

Чувствительность защиты. Защита должна надежно работать при к. з. на защищаемых шинах при минимальном токе к. з. Чувствительность, как обычно, характеризуется коэффициентом

$$k_{\text{ч}} = \frac{I_{к.мин}}{I_{с.з}}. \quad (19-9)$$

Для надежного действия защиты необходимо иметь $k_{\text{ч}} \geq 2$.

19-5. РАЗНОВИДНОСТИ СХЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН [Л. 4]

а) Схема дифференциальной защиты шин для подстанций с одной рабочей и второй резервной системами шин

Подстанция, изображенная на рис. 19-6, нормально работает на одной системе шин, на которую включены все присоединения. Шинносоединительный выключатель В-3 отключен. Вторая система

шин находится в резерве без напряжения. Защита шин подстанций такого типа выполняется по схеме, изображенной на рис. 19-6.

Схема защиты шин должна обеспечивать отключение повреждения не только в условиях нормального режима подстанции, но и во время перевода присоединений с рабочей системы шин на резервную. При переводе присоединений обе системы шин жестко связываются шиносоединительным выключателем В-З, образуя одно целое. В этом случае в зону действия защиты должны входить обе системы шин. Для выполнения этого условия трансформаторы тока шиносоединительного выключателя не подсоединяются к защите. В нормальном режиме шиносоединительный выключатель отключен, и поэтому неподсоединение его трансформатора тока

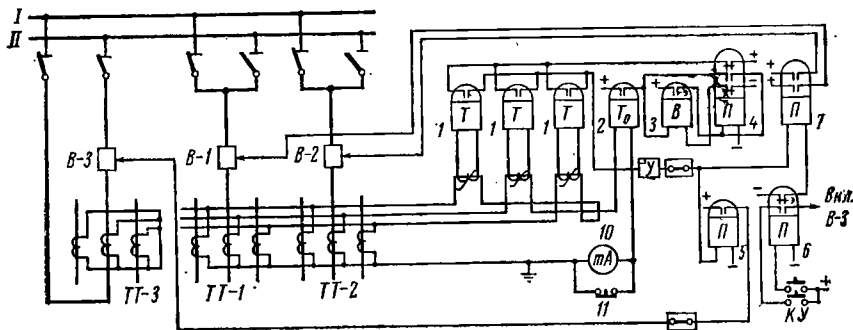


Рис. 19-6. Принципиальная схема дифференциальной защиты шин подстанции с рабочей и резервной системами шин.

к защите не влияет на ее работу. При включении шиносоединительного выключателя резервная система шин попадает в зону действия защиты, поэтому если в момент опробования резервных шин на них окажется к. з., то защита шин сработает и отключит всю подстанцию, в то время как в данном случае было бы достаточно отключить один шиносоединительный выключатель, сохранив в работе рабочие шины. Чтобы устранить указанный недостаток, предусматривается блок *р о в к а*, которая в момент опробования резервных шин прерывает действие защиты на отключение всех присоединений, кроме шиносоединительного выключателя. Благодаря этому при опробовании защита шин может отключать только один шиносоединительный выключатель *В-3*.

После истечения времени $t_{\text{бл}}$, достаточного для включения шиносоединительного выключателя и обратного отключения его в случае к. з. на резервных шинах, блокировка восстанавливает нормальную схему защиты шин с действием на все выключатели.

Б л о к и р о в к а выполняется при помощи промежуточного реле 6 (рис. 19-6) с замедленным возвратом. Верхний контакт этого реле нормально замкнут, и через него проходит минус выходного промежуточного реле 7, действующего на отключение

всех выключателей, кроме шиносоединительного В-3. При включении В-3 от ключа управления КУ реле 6 приходит в действие и снимает минус с реле 7. В качестве реле 6 часто применяется промежуточное реле типа РЭ-500 или РП-252, имеющее замедление на возврат порядка 1—2 с.

Трансформаторы тока шиносоединительного выключателя подключаются к цепям защиты шин при выводе через шиносоединительный выключатель какого-либо присоединения.

б) Схема дифференциальной защиты шин для подстанций, работающих на двух системах шин с фиксированным распределением присоединений

Особенность таких подстанций состоит в том, что в работе находятся две системы шин, связанные секционным или шиносоединительным выключателем (рис. 19-7 и 19-8). Каждое присое-

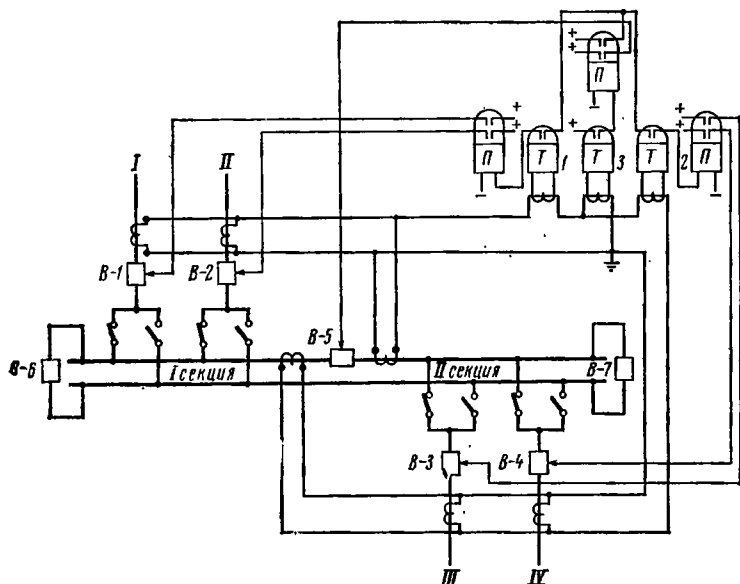


Рис. 19-7. Упрощенная схема дифференциальной защиты шин подстанции, работающей на двух системах шин (секциях) с фиксированным распределением присоединений.

динение включается на определенную систему шин, и это распределение остается неизменным, т. е. фиксируется. Для правильной ликвидации повреждений защита шин должна обеспечивать селективное отключение к. з. на каждой системе шин, отключая секционный выключатель и все присоединения, включенные на повредившиеся шины. Селективность может быть достигнута при-

менением двух самостоятельных защит, охватывающих каждую систему шин. Однако такая схема будет иметь два недостатка:

1. При включении всех присоединений на одну из систем шин защита шин будет работать неселективно при внешних к. з.
2. Защита шин не обеспечит селективности при внешних к. з. при вынужденном нарушении фиксации присоединений.

В обоих случаях защиту шин пришлось бы отключать во избежание ее неселективной работы.

С целью обеспечения селективности при внешних к. з. в указанных режимах применяется схема с тремя комплектами защиты

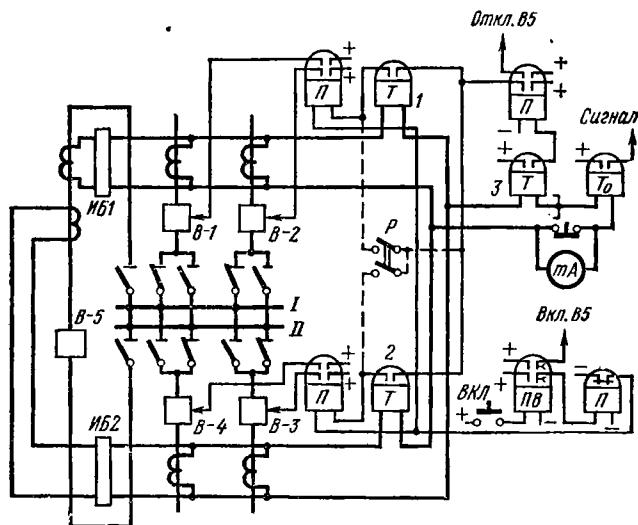


Рис. 19-8. Упрощенная (однофазная) схема дифференциальной защиты подстанции с двойной системой шин с фиксированным распределением присоединений между шинами.

(рис. 19-7 и 19-8). Комплект реле 1 предназначен для защиты первой секции. Он включается по дифференциальной схеме на трансформаторы тока всех присоединений, закрепленных за первой системой шин, и действует на их отключение. Комплект реле 2 служит для защиты второй секции. Его реле 2 питается от дифференциально соединенных трансформаторов тока присоединений, закрепленных за второй секцией, и действует на их отключение.

Комплект 3 является дифференциальной защитой обеих секций. Он включен на сумму токов, проходящих через реле комплектов 1 и 2, и оказывается, таким образом, дифференциально подключенным к трансформаторам тока всех присоединений. Комплект 3 действует при к. з. на шинах как первой, так и второй секции. При внешних к. з. он не работает независимо от того,

как распределены по системам шин присоединения. Реле комплекта 3 подают плюс оперативного тока на реле комплектов 1 и 2 и производят отключение шиносоединительного выключателя.

В случае соблюдения принятой фиксации присоединений все три комплекта не работают при внешних к. з. При к. з. на шинах первой секции действуют комплекты 1 и 3. Для комплекта 2 это к. з. является внешним, и поэтому он не работает. В случае к. з. на второй системе шин комплект 1 защиты не работает. Комплекты же 3 и 2 приходят в действие и отключают все присоединения второй (поврежденной) системы шин. Анализируя поведение защиты при нарушении фиксации, например если присоединение В-2 (рис. 19-7) переведено на вторую секцию (при помощи резервной системы шин и выключателя В-7), можно установить следующее: а) при сквозном к. з. токи в комплектах 1 и 2 не балансируются, в результате чего оба комплекта могут сработать, но так как в комплекте 3 токи уравниваются, то он не работает и не позволяет комплектам 1 и 2 произвести неправильные отключения; б) при к. з. на второй секции токи в комплекте 1 не балансируются, так как в этот комплект поступает избыточный ток от трансформатора тока присоединения В-2, которое включено на вторую секцию, поэтому на отключение срабатывают не только комплекты 3 и 2, но и комплект 1, в результате чего при повреждении на одной системе шин неселективно отключаются обе. Следовательно, в случае нарушения принятой фиксации присоединений по шинам рассмотренная схема сохраняет селективность при внешних к. з., но теряет ее при к. з. на шинах. Чтобы обеспечить селективность (в случае нарушения фиксации) при к. з. на шинах, следует переключить трансформаторы тока

и оперативные цепи присоединений, переведенных на другую систему шин, на комплект защиты шин этой системы.

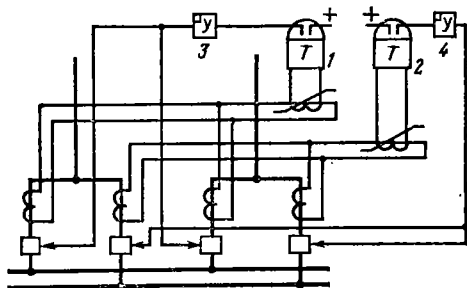


Рис. 19-9. Упрощенная (однофазная) схема дифференциальной защиты шин с двумя выключателями на каждом присоединении.

в) Схема дифференциальной защиты шин с двумя выключателями на каждом присоединении

Каждая система шин оборудуется отдельной дифференциальной защитой (рис. 19-9), действующей на отключение выключателей своих шин. При коротком замыкании на какой-либо системе шин срабатывает ее дифференциальная защита, отключая выключатели поврежденных шин. Защита другой (неповрежденной системы) не действует, благо-

даря чему все присоединения остаются в работе, питаются от оставшейся системы шин. Каждая защита должна иметь устройство для контроля исправности токовых цепей, не показанное на схеме для упрощения (см. рис. 19-6).

19-6. ОЦЕНКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ШИН И ОБЛАСТЬ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Главными достоинствами дифференциальной защиты шин являются быстрота действия, селективность и высокая чувствительность. Наряду с этим дифференциальная защита не действует при качаниях и перегрузке.

Опыт эксплуатации показывает, что при хорошем монтаже, правильном выборе трансформаторов тока и надежной отстройке от токов небаланса защита работает вполне надежно и имеет весьма высокий процент правильного действия.

Дифференциальная защита широко применяется для защиты шин в сетях 110, 220, 330, 500 и 750 кВ. В сетях более низкого напряжения дифференциальная защита применяется относительно редко.

19-7. НЕПОЛНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ШИН

На электростанциях и подстанциях с реактированными линиями и несколькими источниками питания применяется неполная дифференциальная защита по схеме, изображенной на рис. 19-10.

Дифференциальное токовое реле 1 включается на сумму токов всех источников питания, т. е. генератора Г, трансформатора Т и секционного выключателя В-1.

Трансформаторы тока линии Л, не имеющей источников питания, к защите не подключаются, что упрощает схему и является преимуществом неполной схемы дифференциальной защиты по сравнению с полной. Коэффициенты трансформации трансформаторов тока, питающих неполную дифференциальную защиту, должны быть одинаковыми.

При к. з. на отходящих линиях Л (например, в точке K_1) токи к. з. и нагрузки, поступающие в реле 1, не балансируются, так как токи, проходящие по линиям, не попадают в защиту, поэтому в реле 1 проходит сумма токов к. з. $\Sigma I_k = I_{K1}$, притекающих к месту повреждения от источников питания, и суммарный ток нагрузки линий $\Sigma I_{\text{нагр.л.}}$. Для того чтобы защита в этом случае не действовала, ее ток срабатывания должен удовлетворять условию

$$I_{\text{с.з}} = k_n (I_{K1\text{макс}} + \Sigma I_{\text{нагр.л.}}), \quad (19-10)$$

где k_n — коэффициент надежности, равный 1,2—1,3.

При к. з. на соседней секции, в генераторе или за трансформатором (в точках K_2 , K_3 и K_4)

токи к. з., притекающие и утекающие от шин, поступая в реле 1, уравниваются благодаря дифференциальному принципу соединения трансформаторов тока источников питания, поэтому защита не действует.

В нормальном режиме токи нагрузки, проходящие по отходящим линиям, не попадают в реле 1. В результате этого токи в реле не балансируются и в нем появляется остаточный ток, равный сумме нагрузочных токов линий. Однако защита не действует, поскольку суммарный ток нагрузки меньше тока I_{K1} , от которого отстроена защита.

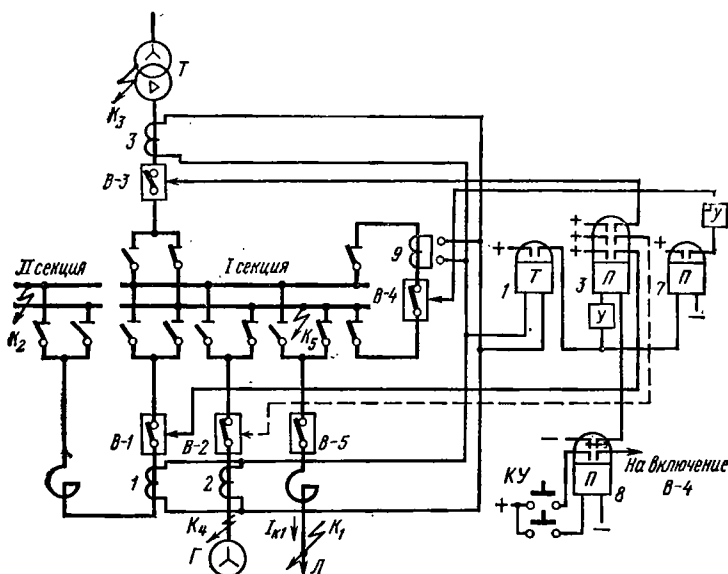


Рис. 19-10. Упрощенная (однофазная) схема неполной дифференциальной защиты шин 6—10 кВ.

При к. з. на защищаемых шинах (точка K_5) в реле проходит сумма токов к. з., поступающих к месту повреждения от источников питания ($\Sigma I_K = I_{K5}$). Если $I_{K5} > I_{с.з.}$ защиты, то она приходит в действие, отключая все источники питания, связывающие шины с системой (т. е. трансформаторы и секционный выключатель генераторов).

По своему принципу работы защита не действует при внешних к. з. и поэтому может выполняться без выдержки времени.

Рассмотренная схема по существу является токовой отсечкой, включенной на сумму токов всех источников питания.

Достоинствами защиты являются ее быстрота действия и большая простота схемы по сравнению с полной дифференциальной защитой.

19-8. ЗАЩИТА ШИН ПРИ ПОМОЩИ ТОКОВОЙ ОТСЕЧКИ

Шины подстанций 10 или 6 кВ, питающие потребителей по кабельным линиям с реакторами (рис. 19-11), можно защищать токовой отсечкой, включенной на ток трансформатора, питающего подстанцию. Отсечка выполняется с двумя реле, включенными в две фазы. Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока к. з. $I_{K1\text{макс}}$ при повреждении и за реактором отходящих линий в точке $K1$:

$$I_{с.з} = k_H I_{K1\text{макс}},$$

где $k_H = 1,3$.

Если нагрузка неповрежденных линий $\Sigma I_{\text{нагр}}$ соизмерима с $I_{K1\text{макс}}$, защита отстраивается от суммарного тока ($I_{K1\text{макс}} + \Sigma I_{\text{нагр}}$). При к. з. на шинах (в $K2$) $I_{K2} > I_{с.з}$ и защита приходит в действие, отключая трансформатор T . Отсечка может применяться только при условии, что $I_{K2}/I_{с.з} \geq 1,5$.

Выдержка времени отсечки принимается, как правило, равной 0,5 с для отстройки от мгновенных дифференциальных защит трансформаторов или синхронных компенсаторов, питающихся от защищаемых шин. При отсутствии необходимости такого согласования отсечка может выполняться мгновенной.

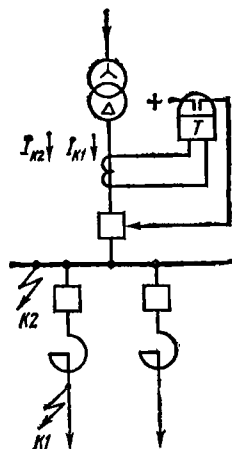


Рис. 19-11. Защита шин с помощью токовой отсечки.

19-9. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА ШИН

Дистанционная защита применяется для защиты шин 6 и 10 кВ, питающих реактированные линии.

Защита устанавливается на трансформаторах T , связывающих защищаемые шины с системой (рис. 19-12), и питается от трансформатора тока $ТТ-1$ и трансформатора напряжения $ТН$. Защита состоит из пускового органа, выполненного с помощью токовых реле 1, и дистанционного органа 2, осуществленного с помощью реле сопротивления C . Обычно применяется односистемная схема, рассмотренная в § 11-17.

Сопротивление срабатывания дистанционного органа 2 выбирается меньшим сопротивлений реакторов линии и трансформатора z_p и z_T :

$$z_{с.з} < z_p \text{ и } z_{с.з} < z_T.$$

При этом условии защита не работает при к. з. за реактором линии или трансформатором связи (в точках K_1 и K_2), так как сопротивление на зажимах дистанционного органа в этих случаях превышает его сопротивление срабатывания.

При металлическом к. з. на защищаемых шинах напряжение, а вследствие этого и сопротивление на зажимах реле сопротивления 2 падают до нуля. Защита при-

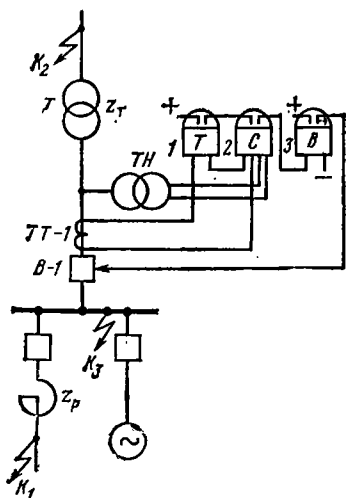


Рис. 19-12. Схема дистанционной защиты шин.

ходит в действие и отключает трансформатор, отделяя тем самым поврежденные шины от системы.

При к. з. на выводах генератора дистанционная защита действует так же, как и при к. з. на шинах. Чтобы обеспечить селективность при таких повреждениях, на защите шин устанавливается выдержка времени $t_{з.ш}$ на ступень выше времени действия дифференциальной защиты генераторов. Практически выдержка времени защиты шин принимается равной:

$$t_{з.ш} = 0,5 \div 0,6 \text{ с.}$$

В случае к. з. до реактора или в реакторе линий защита шин действует быстрее, чем максимальная защита этих линий. Такая неселективность допускается, так как линейные выключатели не рассчитываются на к. з. до реактора.

Дистанционная защита шин генераторного напряжения применяется в тех случаях, когда к. з. на шинах необходимо отключать быстрее, чем это может сделать максимальная защита трансформатора.

19-10. ЗАЩИТА ШИН 110—500 кВ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ ТОКА, ИМЕЮЩИМИ ПОВЫШЕННУЮ ПОГРЕШНОСТЬ

В тех случаях, когда погрешность трансформаторов тока не удается ограничить и она выходит за пределы 10%, рассмотренная выше простая дифференциальная защита шин (§ 19-2) оказывается недостаточно чувствительной и надежной. В этих случаях могут применяться дифференциальные защиты с торможением или дифференциально-фазные защиты. Разработке и освоению этих защит за последнее время уделяется значительное внимание.

Дифференциальная защита шин с торможением. Защита работает так же, как и аналогичная защита трансформаторов (см. § 16-4). Реагирующий орган защиты выполняется с помощью дифференциального реле с торможением, у которого рабочий ток срабатывания ($I_{р.с.р}$) зависит от величины тормозного тока (I_T), т. е. $I_{р.с.р} = f(I_T)$ (рис. 19-13, б). Наличие торможения позволяет допускать значительно большие (чем при простых реле) токи небаланса, возникающие в тех случаях, когда погрешность трансформаторов тока не превышает 10%.

Токовые цепи защиты соединяются, как правило, по дифференциальной схеме, при этом токи плеч используются в качестве тормозных токов I_T , а дифференциальный ток, равный геометрической сумме токов всех присоединений $\sum_1^n I_{прис}$, является рабочим током I_p защиты.

Если в качестве реагирующего органа применяются электромагнитические реле, питающиеся переменным током трансформаторов тока, то число тормозных обмоток реле в общем случае должно быть равно числу присоединений, отходящих от защищаемых шин. Такие защиты получаются сложными и применяются редко.

Защита значительно упрощается при выполнении ее на выпрямленном токе. В этом случае реагирующий орган может осуществляться с помощью поляризованных и магнитоэлектрических реле или на полупроводниках.

Простейшая схема с поляризованным реле, наиболее наглядно поясняющая принцип выполнения дифференциальной защиты с торможением, показана на рис. 19-13, а.

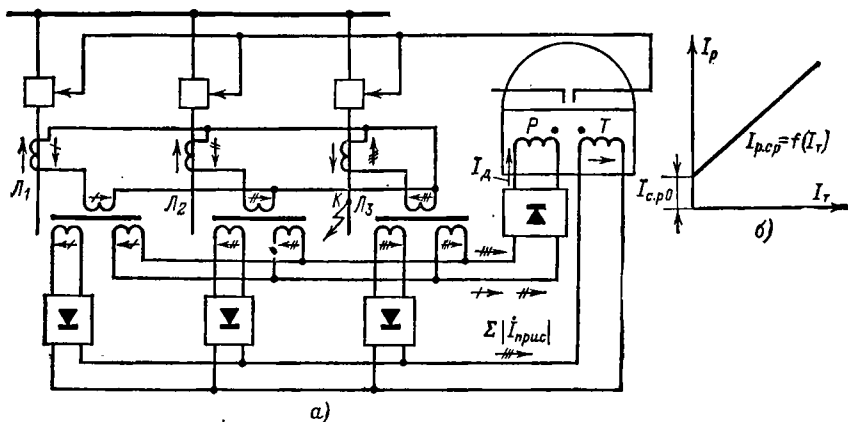


Рис. 19-13. Дифференциальная защита на выпрямленном токе с торможением.

а — схема защиты; б — характеристика $I_{р.сп} = f(I_{т})$.

Тормозная обмотка реле T включена на сумму выпрямленных токов присоединений: $I_{т} = \sum_1^n I_{прис}$. В этом случае тормозной ток равен арифметической сумме токов всех присоединений ($L_1, L_2, \dots, L_n$).

Рабочая обмотка питается выпрямленным дифференциальным током $I_{д}$. Принцип действия такой защиты не требует пояснений. Описание подобной защиты дано в [Л. 104].

Дифференциально-фазная защита шин. Принцип действия защиты основан на сравнении фаз токов присоединений при внешнем к. з. и при к. з. на шинах (рис. 19-14).

Пренебрегая фазными сдвигами первичных токов, можно считать, что в первом случае (при внешнем к. з., рис. 19-14, а) токи, притекающие к шинам и утекающие от них, имеют противоположные фазы (т. е. сдвинуты на 180°), а во втором (рис. 19-14, б) — токи всех присоединений совпадают по фазе.

В соответствии со сказанным реагирующий орган дифференциально-фазной защиты должен сравнивать между собой углы

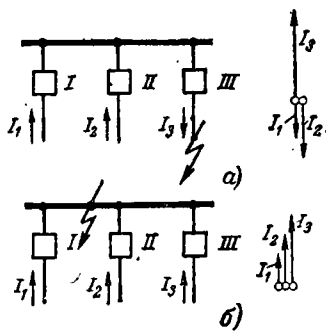


Рис. 19-14. Распределение и фазы токов присоединений при к. з. вне шин (а) и на шинах (б).

сдвига фаз токов всех присоединений. При совпадении фаз токов всех присоединений реагирующий орган должен работать, а при наличии тока хотя бы одного присоединения, сдвинутого на 180° , — не действовать. Такое сравнение можно осуществить с помощью схемы, показанной на рис. 19-15, а, характеризующей общий принцип выполнения подобного фазного органа.

Вторичные обмотки вспомогательных трансформаторов BT , установленных на каждом присоединении, соединяются одноименными зажимами на параллельную работу через однополупериодные выпрямители B , пропускающие только положительные полуволны питающего их тока.

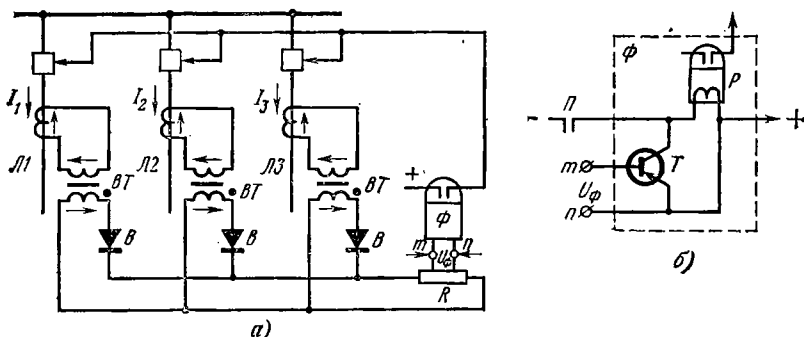


Рис. 19-15. Принцип выполнения дифференциально-фазной защиты (а), упрощенная схема реле сравнения фаз (фазного органа) (б).

К выходу этого контура подключен фазный орган Φ , реагирующий на сдвиг фаз между первичными токами присоединений $I_1, I_2, \dots, I_n$.

Поскольку выпрямители B всех присоединений соединены параллельно, из всех токов присоединений (совпадающих по фазе) через выпрямители будет проходить только один ток, положительная полуволна которого имеет наибольшее значение $I_{\max}$. Выпрямители B на остальных присоединениях (с меньшими токами) будут закрыты обратным напряжением, создаваемым выпрямителем, пропускающим ток $I_{\max}$.

Таким образом, к органу сравнения фаз Φ подводится напряжение $U_\phi = kI_{\max}R$.

При к. з. на защищаемых шинах (в K_1 на рис. 19-16, а) токи по всем присоединениям, имеющим источники питания, направлены к месту к. з., т. е. к шинам, и совпадают по фазе, если не учитывать различие в углах сопротивлений присоединений и фаз э. д. с. источников питания. В этих условиях положительные полуволны первичного тока всех присоединений совпадают. Ток присоединения, по которому проходит наибольший ток к. з., пропускается соответствующим выпрямителем,

проходит по сопротивлению R и воздействует на реагирующий орган Φ (рис. 19-15).

В отрицательные полупериоды тока присоединений диоды выпрямителей B заперты и ток в фазном контуре отсутствует. В результате этого напряжение U_{ϕ} на входе фазного органа имеет прерывистый характер, как показано на рис. 19-16, а.

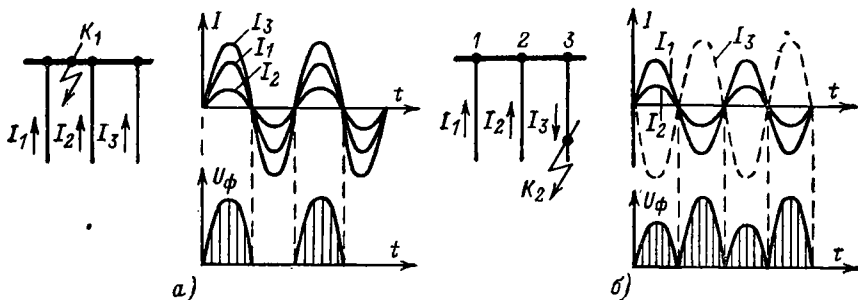


Рис. 19-16. Диаграммы токов в фазном органе защиты.

а — при к. з. на шинах; б — при к. з. вне шип.

Фазный орган устроен так, что при наличии разрыва («скажности») в кривой входного напряжения он срабатывает.

При внешнем к. з. токи, идущие к шинам и уходящие от них к месту к. з., сдвинуты на 180° .

В результате этого ток в фазном контуре течет непрерывно, соответственно этому кривая U_{ϕ} имеет также непрерывный характер (рис. 19-16, б). При наличии сплошного импульса на входе фазный орган Φ не работает.

Фазная характеристика реле Φ , определяющая зависимость его $I_{с.р} = f(\varphi)$ приведена на рис. 19-17. С учетом угловых погрешностей, возникающих из-за различия в фазах э. д. с. источников питания, углов сопротивлений присоединений и угловой погрешности трансформаторов тока ширина зоны действия фазного органа принимается приблизительно равной 140° .

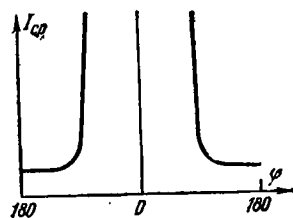


Рис. 19-17. Зависимость тока срабатывания дифференциально-фазной защиты от угла φ сдвига фаз токов присоединений.

В ряде защит [Л. 77, 79] орган сравнения фаз Φ выполняется с помощью транзистора T , управляющего работой электромагнитного реле P , как показано на рис. 19-15, б. При наличии напряжения U_{ϕ} триод открыт и шунтирует реле P , не позволяя ему работать. При отсутствии U_{ϕ} триод T закрывается и реле может работать.

Специальные испытания показывают, что дифференциально-фазные защиты, обладая достаточной чувствительностью при к. з.

на шинах, могут быть надежно отстроены от небалансов при выполнении защиты на трансформаторах тока с погрешностью, достигающей в установившемся режиме 20—30%.

Дифференциально-фазная защита может выполняться односистемной, для этого необходимо, чтобы вспомогательные трансформаторы *ВТ* были выполнены в виде сумматоров или комбинированных фильтров.

В СССР применяются дифференциально-фазные защиты, разработанные Грузэнерго [Л. 78], Белорусэнерго, использовавшими опыт применения подобных защит в Чехословакии [Л. 77] и Институтом автоматики Министерства приборостроения.

Оценка защит. Оба варианта дифференциальной защиты (с торможением и фазным органом) чувствительнее простой дифференциальной защиты шин, более надежно отстраиваются от внешних к. з., позволяют снизить требования к точности трансформаторов тока и уменьшить сечение контрольного кабеля в токовой цепи защиты.

Общим недостатком обеих защит является отсутствие мер по отстройке от повышенных погрешностей трансформаторов тока в переходных режимах, обусловленных аperiodической составляющей тока к. з.

Дальнейшие разработки и опыт эксплуатации этих защит позволят полнее оценить оба варианта новых защит и целесообразность их широкого применения. Завод ЧЭАЗ начинает выпуск защиты с торможением.

ГЛАВА ДВАДЦАТАЯ

РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

20-1. НЕОБХОДИМОСТЬ И СПОСОБЫ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Статистика показывает, что при автоматической ликвидации повреждений отмечаются отдельные случаи отказа в действии релейной защиты или выключателей.

Несмотря на относительную редкость таких случаев, с ними нельзя не считаться, поскольку отказ защиты или выключателя означает неотключение к. з. со всеми вытекающими из этого последствиями (длительное прохождение токов к. з. и снижение напряжения в сети).

Подобные отказы могут вызывать тяжелые аварии, сопровождающиеся массовым повреждением оборудования (не рассчитанного на длительное прохождение сверхтоков к. з.) и нарушением электроснабжения потребителей из-за понижения напряжения и нарушения устойчивости энергосистем. Наряду с принятием мер по повышению надежности и безотказности действия релейной защиты и выключателей особо важное значение приобретает резер-

вирование отключения повреждений в случае отказа выключателя или действующей на него защиты.

Известны и применяются два способа резервирования:

1) резервирование, осуществляемое защитами смежных участков (дальнее резервирование);

2) резервирование, осуществляемое защитами и выключателями той подстанции, где произошел отказ.

В этом случае для резервирования защиты на каждом присоединении устанавливаются две защиты (основная и резервная), взаимно резервирующие друг друга. Для резервирования выключателя предусматривается специальное устройство резервирования отказа выключателя (УРОВ). Это устройство пускается от защит отказавшего выключателя и действует на отключение всех присоединений данной подстанции, непосредственно питающих неотключившееся к. з.

Этот способ резервирования именуется местным, или ближним резервированием.

Первый способ резервирования предусматривает, что в зону действия защиты смежного участка должен входить не только свой, но и следующий за ним участок (рис. 20-1). Тогда при отказе защиты *В* или выключателя *В* следующего участка защита смежного участка *А* приходит в действие и отключает к. з. своим выключателем *А*.

В тех случаях, когда по условиям быстродействия линия оборудуется дифференциальной или высокочастотной защитой, для целей резервирования предусматривается дополнительная, так называемая резервная защита, способная действовать при к. з. на следующем участке. Одновременно эта же резервная защита действует при отказе основной защиты своего участка.

В качестве резервных защит используются токовые защиты нулевой последовательности для отключения к. з. на землю и максимальные токовые или дистанционные защиты для ликвидации междуфазных к. з.

В целях упрощения установка резервных защит от междуфазных к. з. допускается не на всех линиях, а лишь в отдельных точках сети, выбираемых с учетом ответственности подстанций и последствий неселективного отключения нескольких участков.

Принципиальным преимуществом дальнего резервирования является его высокая надежность. Резервируемые (*В*) и резервирующие (*А*) защиты и выключатели находятся на разных подстанциях, и, следовательно, неисправности и неполадки, возникшие на резервируемой подстанции, не могут повлиять на работу резервирующих устройств.

Однако в сложных сетях с протяженными и сильно загруженными линиями при наличии параллельных ветвей и мощных подпиток (например, от источника *Г2* на рис. 20-1) резервные защиты (*А* на рис. 20-1) оказываются недостаточно чувствительными

даже и в тех случаях, когда они выполняются посредством защиты нулевой последовательности и дистанционной защиты.

Этот недостаток дальнего резервирования ограничивает его применение и вынуждает искать другие пути, обеспечивающие большую чувствительность резервирования.

Второй способ резервирования получил значительное распространение на подстанциях, где дальнее резервирование оказывается нечувствительным или неселективным. Принцип действия УРОВ очень прост (рис. 20-2, а).

В случае отказа выключателя B_3 его защита $З$ по истечении времени, достаточного для прекращения к. з., при нормальной работе выключателя и защиты поврежденного присоединения (B_3 и $З$) действует на отключение всех выключателей, через которые продолжается питание повреждения (B_1 и B_2 на рис. 20-2, а).

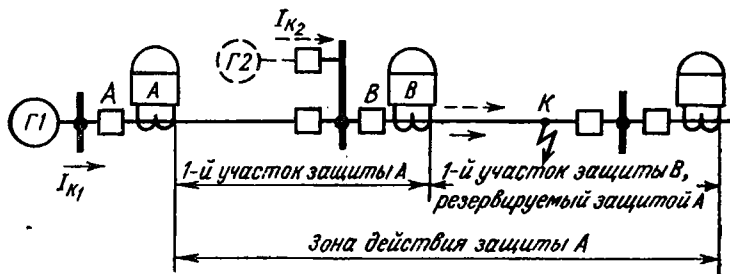


Рис. 20-1. Принцип дальнего резервирования отказа в работе выключателей или защиты с помощью защит предыдущего участка сети.

Очевидно, что УРОВ не может резервировать отказ самой защиты $З$. Поэтому его применение предполагает необходимость второго (дублирующего) комплекта защиты для резервирования отказа основной защиты. Обе защиты должны выполняться независимыми друг от друга, так чтобы неисправности в цепях и устройствах одной не могли вызывать отказ второй. Для этой цели каждая защита включается на отдельные трансформаторы тока, оперативные цепи каждой защиты должны питаться от разных предохранителей и иметь разные выходные промежуточные реле.

Устройство резервирования отказа выключателя обладает высокой чувствительностью, так как пусковым органом его является основная защита присоединения, обычно имеющая достаточную чувствительность в пределах защищаемого элемента. Помимо того, УРОВ имеет определенные преимущества по сравнению с первым способом резервирования (дальним) в части селективности. Так, на подстанциях с двумя выключателями на присоединение, а также на подстанциях, выполненных по схеме многоугольника (рис. 20-2, б и в), при к. з. на линии и отказе выключателя B_1 УРОВ позволяет сохранить в работе подстанцию

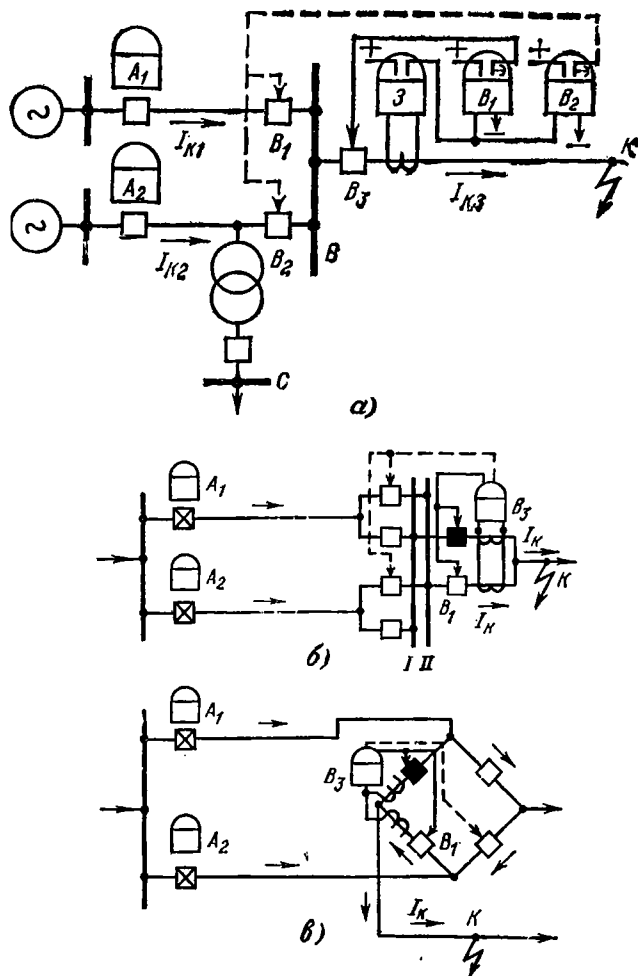


Рис. 20-2. Принцип ближнего резервирования с помощью устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ).

а — принцип действия УРОВ; б — для схемы с двумя выключателями на присоединении; в — ближнее резервирование для схемы четырехугольника.

■ — выключатель, отключившийся при к. з. на присоединении;
 ☒ — выключатель, отключаемый резервной защитой предыдущего участка. Пунктиром показаны цепи отключения от устройства УРОВ.

и все линии, кроме поврежденной, в то время как дальнейшее резервирование с помощью защит A_1 и A_2 предыдущей линии приводит к отключению всей подстанции (рис. 20-2, б, в). Это преимущество имеет существенное значение на мощных станциях и узловых ответственных подстанциях особенно в тех случаях, когда через них

передается большая транзитная мощность, а также при наличии на линиях ответвлений C , как показано на рис. 20-2, a .

Кроме резервирования отказа отключения выключателей, специальное УРОВ обеспечивает быстрое отключение повреждений

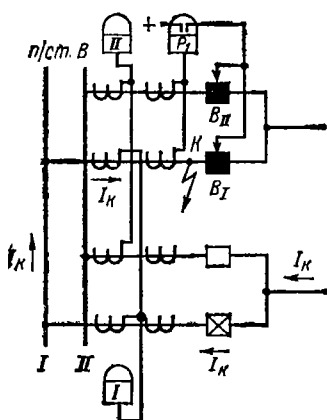


Рис. 20-3. Действие УРОВ при к. з. между выключателем и трансформатором тока.

■ — выключатели, отключающиеся при к. з. в точке K ;
 ☒ — выключатель, отключаемый УРОВ.

на участке между выключателем и его трансформаторами тока, когда последние устанавливаются только с одной стороны выключателя (рис. 20-3). При к. з. на этом участке, например в точке K , защита P_1 поврежденного присоединения хотя и подействует на отключение выключателя B_1 , но не сможет отделить повреждения от шин подстанции B , защита же шин I и II этой подстанции не работает, так как к. з. в точке K находится вне зоны ее действия. Отключение к. з. производится в данном случае резервными защитами, установленными на противоположных концах присоединений, питающих подстанцию B . В тех случаях, когда выдержка времени этих защит значительна или их действие приводит к неселективному отключению всей подстанции, при схеме коммутации, допускающей отключение ее части (например, при схеме многоугольника или с двумя вы-

ключателями), для ликвидации указанных повреждений целесообразно применение указанного выше специального устройства резервирования (УРОВ).

20-2. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ УСТРОЙСТВА РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ОТКАЗА ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ (УРОВ)

Из принципа действия УРОВ следует, что при срабатывании оно должно отключать все присоединения одной секции или системы шин подстанции или электростанции. Поэтому ложное действие УРОВ может вызывать полное или частичное нарушение работы подстанции или электростанции с тяжелыми, как правило, последствиями для энергосистемы и ее потребителей. В то же время вероятность ложной работы УРОВ больше, чем у других защит. Это объясняется тем, что пуск УРОВ осуществляется от защит всех присоединений. Вследствие этого неисправность в защите любого присоединения или ошибка обслуживающего персонала при их проверке может привести к неправильной работе УРОВ.

Для исключения ложной работы схема УРОВ выполняется с двумя независимыми друг от друга пусковыми органами, одним — является защита присоединения, как было показано на рис. 20-2, а, вторым — дополнительное пусковое устройство, контролирующее наличие к. з. в зоне действия УРОВ. Второй пусковой орган не позволяет работать УРОВ при отсутствии к. з. и предупреждает таким образом его ложную работу из-за неисправности защит присоединения или ошибочных действий персонала.

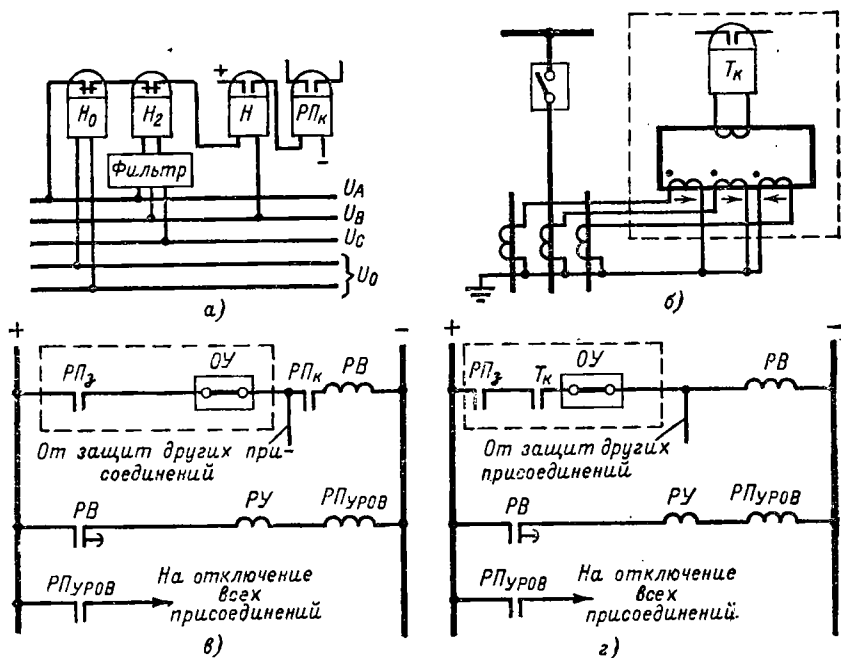


Рис. 20-4. Принципиальная схема устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ).

а, б — цепи устройств контроля неотключившегося к. з.; в, г — оперативные цепи УРОВ.

Второй пусковой орган выполняется с помощью реле напряжения или тока, реагирующих на появление к. з. в сети (рис. 20-4, а и б). Вторые пусковые реле должны надежно действовать при к. з. в пределах защищаемого присоединения.

Схема пускового устройства с реле напряжения показана на рис. 20-4, а. Она состоит из реле минимального напряжения H , включенного на междуфазное напряжение и реагирующего на трехфазные к. з., и двух реле, реагирующих на несимметричные к. з. Одно реле H_2 включено на напряжение обратной последова-

тельности; второе H_0 питается напряжением $3U_0$. При действии реле H , H_2 или H_0 срабатывает промежуточное реле $РР_K$, которое замыкает свои контакты и разрешает выходному реле защиты $РП_3$ пустить УРОВ (рис. 20-4, в).

На рис. 20-4, б показан контроль наличия к. з. с помощью токового реле T_K . В качестве последнего применяется трехфазное токовое реле типа РТ-40/Р или три однофазных токовых реле. Трехфазное реле T_K , показанное на рис. 20-4, б, работает при всех видах к. з. При срабатывании реле T_K замыкает свои контакты, разрешая работать УРОВ.

Принципиальная схема УРОВ приведена на рис. 20-4, в и г. При к. з. на защищаемом присоединении срабатывает выходное реле защиты $РП_3$, замыкая цепь отключения выключателя присоединения и цепь пуска УРОВ.

Если выключатель не действовал и к. з. продолжается, то реле контроля $РР_K$ в схеме на рис. 20-4, в и реле T_K в схеме на рис. 20-4, г разрешают сработать реле времени $PВ$, которое приводит в действие выходное реле УРОВ ($РП_{УРОВ}$). Последнее подает импульс на отключение всех присоединений, продолжающих питать к. з. При ошибочном пуске защиты срабатывает реле $РП_3$, но УРОВ не действует, так как контакты реле, контролирующего наличие к. з. ($РР_K$ или T_K), остаются разомкнутыми.

В цепи пуска УРОВ на защите каждого присоединения устанавливается отключающее устройство $ОУ$, позволяющее при проверке защиты или ее неисправности разомкнуть цепь, по которой подается импульс на пуск УРОВ.

На подстанциях, оборудованных защитой шин, в качестве выходных реле УРОВ могут использоваться выходные реле защиты шин.

Контроль наличия к. з. с помощью токовых реле применяется на подстанциях, выполненных по полуторной схеме, по схеме многоугольника, или с двумя системами шин и двумя выключателями на присоединение.

При таких схемах каждое присоединение отключается двумя выключателями. Поэтому устройство контроля наличия к. з. должно обладать способностью определять, какой из двух выключателей присоединения отказал. Эту задачу легко разрешить, установив в цепи каждого выключателя присоединения токовые реле T_{K1} и T_{K2} , фиксирующие прохождение тока по выключателю (рис. 20-5, а).

В отключившемся выключателе ток пропадает, в отказавшем — остается. В зависимости от этого работает реле T_{K1} или T_{K2} , разрешая отключать те присоединения подстанции, которые продолжают питать к. з. при отказе данного выключателя (рис. 20-5, б).

Выбор уставок на реле устройства. Время действия УРОВ ($t_{УРОВ}$) должно быть больше времени действия защиты на отклю-

чение ($t_{откл.}$) на некоторую величину $\Delta t = t_{уров} - t_{откл.}$. Это время устанавливается на дополнительном реле времени УРОВ (на рис. 20-4, *в* и *г* оно обозначено *РВ*).

Защита подает импульс на выключатель и реле времени УРОВ одновременно. Для предупреждения действия УРОВ при нормальном отключении выключателя необходимо выбрать

$$t_{уров} = t_{откл. в} + t_{воз. з} + t_{ош РВ} + t_{зап}, \quad (20-1)$$

где $t_{откл. в}$ — время отключения выключателя; $t_{воз. з}$ — время, необходимое для возврата защиты, пускающей УРОВ; $t_{ош РВ}$ — время ошибки реле времени УРОВ в сторону ускорения действия; $t_{зап}$ — запас по времени.

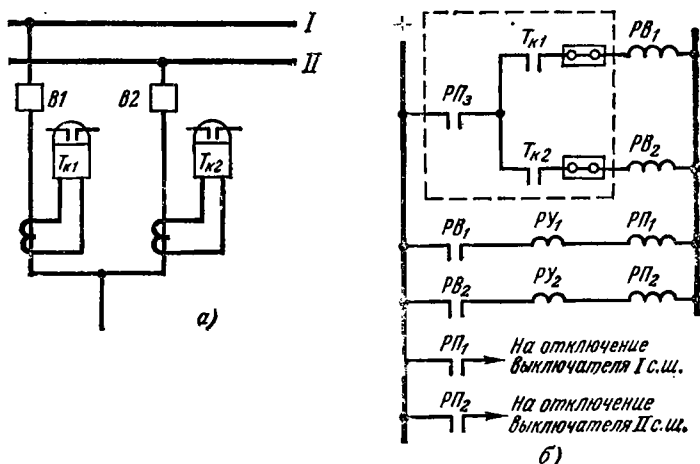


Рис. 20-5. Схема резервирования отказа выключателей при двух выключателях на присоединении.

а — схема присоединения и включения контрольных пусковых реле $T_{к1}$ и $T_{к2}$; *б* — оперативные цепи УРОВ.

Чтобы предупредить действие защит на смежных подстанциях при действии УРОВ, необходимо выбирать выдержки времени на резервных ступенях защит этих подстанций с учетом $t_{уров}$. Это замедляет выдержку времени на резервных защитах смежных участков на $\Delta t = t_{уров}$.

Уставки на реле напряжения и тока устройств, контролирующих наличие к. з., выбираются с учетом надежного действия этих реле при к. з. в конце резервируемого присоединения и из условия возврата после отключения к. з. (см. [Л. 99]).

20-3. ОЦЕНКА УСТРОЙСТВ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ

Устройство резервирования отказа отключения выключателя в коммутационном отношении является сложным устройством, так как в нем сходятся цепи отключения всех выключателей и оперативные цепи защит. Этим определяется большая ответственность устройств резервирования.

С учетом сложности и ответственности специальные устройства резервирования имеют ограниченное применение. Их следует предусматривать в тех случаях, когда резервные защиты не могут обеспечить резервирование следующих участков, а неотключенное к. з. из-за отказа выключателя сопровождается резким и опасным для системы снижением напряжения.

Устройства резервирования целесообразно также применять на особо ответственных подстанциях с тремя выключателями на два присоединения, с двумя выключателями на присоединение или на подстанциях, соединенных по схеме многоугольника для отключения при отказе выключателей не всей подстанции, а ее части.

ПРИЛОЖЕНИЕ

МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРАХ

Защита предназначена для линий 6—10 кВ, разработана ВНИИэлектропривод на типовых функциональных и логических элементах серии «Логика», изготавливается заводом ЧЭАЗ. Структурная схема защиты представлена на рис. П-1. Защита выполняется двухфазной, она состоит из двух измерительных

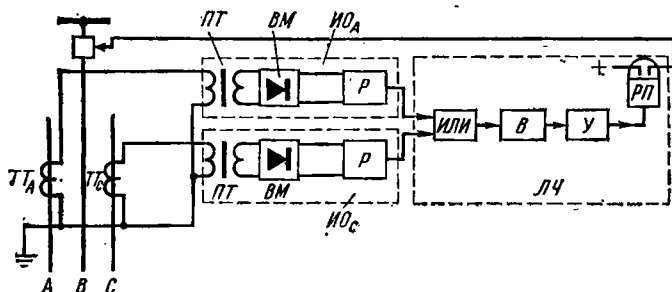


Рис. П-1. Структурная схема максимальной защиты на полупроводниках.

органов $ИО_A$ и $ИО_C$, один из которых реагирует на ток фазы A , а второй — фазы C , и логической части $ЛЧ$, включающей в себя логический элемент $ИЛИ$, элемент времени $В$, усилитель $У$ и выходное промежуточное реле $РП$. Измерительный орган представляет собой токовое реле на выпрямленном токе, состоящее из промежуточного трансформатора тока $ПТ$, выпрямителя $ВМ$ и усилителя $Р$, работающего в релейном режиме (триггера). Вторичный ток $I'_в$ (рис. П-2) трансформаторов тока поступает в промежуточный трансформатор $ПТ$, который уменьшает его до допустимого для элементов схемы значения. С помощью выпрямителя $В$ вторичный ток трансформатора $ПТ$ $I'_в$ выпрямляется и подводится на вход (точка $М$) релейного элемента $Р$ типа ЭТ-Ф05. При токе в линии $I_л > I_{с.з}$ на выходе релейного элемента $Р$ появляется напряжение $U_{р.вых}$, которое воздействует на элемент

времени B (рис. П-3). Реле B является конденсаторным реле времени типа ЭТ-В06, создающим выдержку времени защиты. Элемент времени B работает при действии любого из двух реле P и связан с ними с помощью схемы ИЛИ. По истечении установлен-

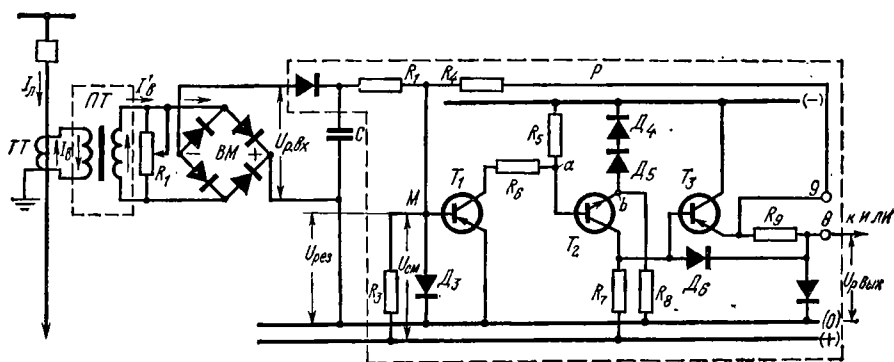


Рис. П-2. Измерительный орган защиты (P).

ной выдержки времени на выходе B появляется напряжение, которое подводится на вход однокаскадного усилителя $У$ типа Т-402. Последний усиливает сигнал, полученный от B , и замыкает цепь выходного промежуточного реле $РП$. Реле $РП$ срабатывает и подает импульс на отключение защищаемой линии.

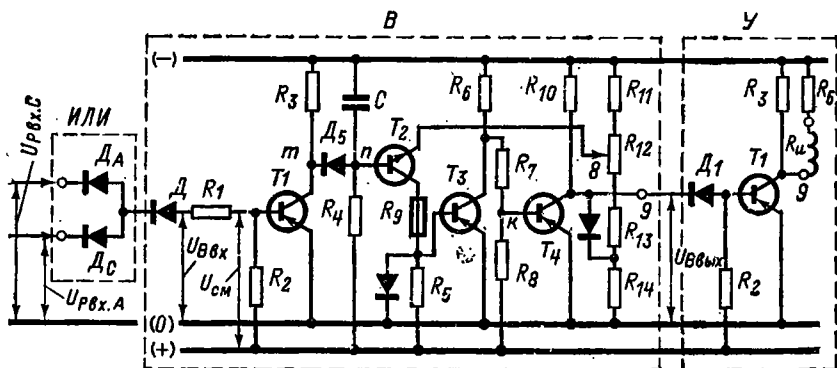


Рис. П-3. Логическая часть защиты (ИЛИ, B и $У$).

Полные схемы измерительного органа и логической части защиты показаны на рис. П-2 и П-3. Питание электродов транзисторов в каждом элементе этих схем (P , B , $У$) осуществляется от специальных шин ($+$), ($-$) и (0), на которые подается стабилизированное напряжение от блока питания, не показанного на

схеме. Потенциал шинки (+) равен +6 В, шинки (—) —12 В и шинки (0) — нулю.

Рассмотрим схему измерительного органа и логической части и покажем, что устройство в целом действует как максимальная токовая защита.

Измерительный орган (рис. П-2). Как уже было отмечено, ток линии $I_{\text{л}}$ трансформируется с помощью трансформаторов тока $ТТ$ и промежуточного трансформатора $ПТ$, выпрямляется выпрямительным мостом $ВМ$ и подводится на вход (в точку $М$) релейного элемента $Р$. Релейный элемент является реагирующим элементом измерительного органа; он представляет собой трехкаскадный усилитель постоянного тока с положительной обратной связью. Обратная связь обеспечивает лавинообразный процесс нарастания выходного напряжения (сигнала) $U_{\text{р.вых}}$, т. е. скачкообразное его изменение, при появлении входного сигнала $U_{\text{р.вх}}$ больше определенного значения, которое можно назвать напряжением срабатывания реле $U_{\text{с.р.}}$.

Как видно из рис. П-2, на базу триода T_1 (точку $М$) через сопротивление R_3 подается положительное напряжение смещения $U_{\text{см}}$, а через сопротивление R_1 — напряжение $U_{\text{р.вх}}$, получаемое с зажимов выпрямителя $ВМ$. Результирующее напряжение на базе T равно:

$$U_{\text{рез}} = U_{\text{см}} - U_{\text{р.вх}}. \quad (\text{П-1})$$

Напряжение $U_{\text{см}} = \text{пост.}$, поэтому знак и величина $U_{\text{рез}}$ зависят от величины $U_{\text{р.вх}}$, которое определяется током $I_{\text{л}}$. Пограничным условием начала работы элемента $Р$, а следовательно, и измерительного органа является равенство $U_{\text{р.вх}} = U_{\text{см}}$, чему соответствует определенная величина тока $I_{\text{л}}$. Этот ток является током срабатывания защиты $I_{\text{с.з.}}$. При $I_{\text{л}} < I_{\text{с.з.}}$ напряжение $U_{\text{рез}}$ на базе транзистора T_1 имеет [согласно (П-1)] положительный знак, при этом триод T_1 закрыт, а его коллектор и точка a , к которой подключена база T_2 , имеют отрицательный потенциал —12 В. Триод T_2 представляет собой транзистор типа $n-p-n$. Как известно, такой транзистор открывается при положительном смещении и закрывается при отрицательном. Следовательно, при закрытом триоде T_1 триод T_2 также закрыт, так как потенциал точки a (базы T_2) ниже потенциала точки b (эмиттера T_2) на величину падения напряжения в сопротивлениях диодов D_4 и D_5 , по которым проходит ток цепи, образованной сопротивлением R и рассматриваемыми диодами. При закрытом триоде T_2 на базу триода T_3 подается положительное напряжение смещения через сопротивление R_7 , которое при закрытом триоде T_2 равно 6 В, если пренебречь сопротивлением открытых диодов D_6 и D_7 . При этих условиях триод T_3 закрыт, а напряжение на выходе элемента $Р$ в точке 8 $U_{\text{р.вых}} = 0$, так как эта точка связана с нулевой шиной открытым диодом D_7 . Из сказанного следует, что при

$I_{\text{л}} < I_{\text{с.з}}$ выходной сигнал измерительного органа равен нулю, это означает, что измерительный орган не действует.

При появлении тока $I_{\text{л}} > I_{\text{с.з}}$ напряжение $U_{\text{рез}}$ на базе триода T_1 изменяет знак на отрицательный и триод T_1 начинает открываться. Открытие триода T_1 вызывает появление положительного потенциала на базе триода T_2 . Последний открывается и подает на базу T_3 отрицательный потенциал, триод T_3 начинает открываться, при этом потенциал точки 9 меняется. Он становится по мере уменьшения сопротивления триода T_3 более отрицательным, приближаясь к -12 В. По обратной связи с зажима 9 через сопротивление R_4 на базу T_1 дается дополнительный ток, способствующий открытию T_1 , T_2 и T_3 . Процесс носит лавинообразный характер. При полном открытии всех триодов на выходе 8 появляется отрицательный сигнал $U_{\text{Рвых}} = -12$ В, это означает, что реагирующий элемент P измерительного органа сработал. *Сказанное показывает, что рассмотренный измерительный орган ведет себя как реле максимального тока.* Регулирование $I_{\text{с.з}}$ приводится с помощью делителя R_1 . Выходной сигнал с зажима 8 измерительного элемента подается на схему ИЛИ.

Логическая часть защиты (рис. П-3). Все элементы логической части (ИЛИ, В, У) питаются так же, как и измерительный орган от трех шинок $(-)$, $(+)$ и (0) , имеющих те же потенциалы $(-12$ В, $+6$ В, 0 В).

Элемент ИЛИ образуется двумя диодами D_A и D_C , с выхода которых сигнал поступает через диод D и сопротивление R_1 на вход элемента времени B (базу триода T_1).

Элемент времени имеет четыре триода: T_1 , T_3 , T_4 типа $p-n-p$ и T_2 типа $n-p-n$. Для создания выдержки времени служит конденсатор C . При отсутствии выходного сигнала на измерительном органе сигнал на входе элемента времени $U_{\text{Ввых}} = 0$. В этом случае триод T_1 закрыт, так как по сопротивлению R_2 на базу T_1 подается смещение $U_{\text{см}} = +6$ В. Сопротивление $R_4 \geq R_3$ (в 100 раз), поэтому напряжение на конденсаторе C , равное падению напряжения на R_3 , при закрытом триоде T_1 будет близко к нулю, вследствие чего конденсатор C разряжен. Как видно из схемы, база триода T_2 (триод типа $n-p-n$) имеет отрицательное смещение, поэтому триод T_2 закрыт. На базу T_3 по сопротивлению R_5 подается смещение $+6$ В, поэтому T_3 также закрыт. По делителю, образованному сопротивлениями R_6 , R_7 , R_8 , на базу транзистора T_4 подается отрицательный сигнал ($\approx -2,35$ В). Триод T_4 открыт и подает на зажим 9, являющийся выходом элемента B , потенциал нулевой шинки, который равен нулю. В результате этого напряжение $U_{\text{Ввых}} = 0$, т. е. выходной сигнал отсутствует. Таким образом, при отсутствии входного сигнала элемент B не работает.

У с и л и т е л ь (У). Потенциал с выхода 9 элемента B подается на усилитель $У$. При нулевом потенциале на входе усилителя база триода T_1 имеет положительное смещение $+6$ В по сопротивле-

нию R_2 и он закрыт. При этом цепь катушки реле PP , включенного в цепь коллектора T_1 , разомкнута и реле не работает.

После срабатывания измерительного органа фазы A или C или обоих вместе на выходе элемента **ИЛИ** появляется сигнал отрицательного знака -12 В, поступающий на вход элемента времени B , на базу триода T_1 этого элемента. Результирующее напряжение на базе T_1 в этом случае равно разности $U_{см} - U_{вх}$ и имеет отрицательный знак, так как $U_{вх} > U_{см}$. При отрицательном напряжении на базе триод T_1 открывается. После открытия T_1 потенциал точки m становится больше потенциала точки n и диод D_3 закрывается. Под действием разности напряжения (18 В) между шинками (+) и (−) конденсатор C начинает заряжаться. Зарядный ток проходит по контуру R_4C . Через время t , определяемое постоянной $T = 1/R_4C$, потенциал базы T_2 (точки n) сравнивается с потенциалом зажима 8. Тогда триод T_2 открывается и на базе T_3 возникает отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал. Триод T_3 открывается, подавая в точку K потенциал нулевой шины (0). При этом база триода T_4 получает положительный потенциал и закрывается. На выходе элемента B (зажим 9) появляется отрицательный сигнал через диод D_4 , получаемый с точки I делителя $R_{11} - R_{12} - R_{13} - R_{14}$. Отрицательный сигнал с зажима 9 элемента B поступает на вход усилителя $У$. Триод усилителя T_1 открывается, замыкая цепь выходного реле PP , последнее срабатывает и посылает импульс на отключение. После отключения защищаемой линии ток $I_{л}$ пропадает и все триоды схемы возвращаются в первоначальное состояние, в связи с чем выходные сигналы элементов P , B и $У$ становятся равными нулю, ток в реле PP исчезает и оно прекращает свою работу. Регулирование времени действия элемента B осуществляется изменением емкости конденсатора C и сопротивления R_4 .

Из приведенного анализа работы схем измерительного органа и логической части следует вывод, что защита реагирует на величину тока и срабатывает при токе $I_{л} > I_{с.з.}$ с заданной выдержкой времени, т. е. ведет себя как токовая максимальная защита с независимой характеристикой.

Для удобства промышленного производства и эксплуатации рассмотренная схема максимальной защиты выполняется в виде единого блока, называемого по терминологии, принятой в электронной технике, м о д у л е м. Все элементы схемы: транзисторы, диоды, сопротивления, конденсаторы — размещаются на платах с печатным монтажом и заливаются эпоксидным компаундом, защищающим элементы модуля от повреждения. В случае появления неисправностей модуль заменяется новым. Подобные схемы находятся в эксплуатации и работают надежно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила устройства электроустановок. Изд-е 4-е. М., «Энергия», 1965.
2. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 1. Защита генераторов, работающих на сборные шины. М., Госэнергоиздат, 1961.
3. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 2. Ступенчатая токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—220 кВ. М., Госэнергоиздат, 1961.
4. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 3. Защита шин 6—220 кВ станций и подстанций. М., Госэнергоиздат, 1961.
5. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 4. Защита понижающих трансформаторов и автотрансформаторов. М., Госэнергоиздат, 1962.
6. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 5. Защита блоков генератор—трансформатор и генератор—автотрансформатор. М., Госэнергоиздат, 1963.
7. ГОСТ 7524-62. Обозначения условные графические для электрических схем. М., Изд-во стандартов, 1965.
8. Сыромятников И. А. Преимущества применения переменного оперативного тока. — «Электрические станции», 1954, № 1.
9. Ступель Ф. А. Электромеханические реле. Изд. Харьковского университета, 1956.
10. Беркович М. А. и др. Справочник по релейной защите. М., Госэнергоиздат, 1963.
11. Овчинников В. В. Электромагнитные реле тока и напряжения. М., «Энергия», 1965.
12. Елфимов В. М. Реле направления мощности. М., «Энергия», 1966.
13. Федосеев А. М. Основы релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1961.
14. Дыкин А. В. Электронные и полупроводниковые приборы. М., «Энергия», 1965.
15. Федотов Я. А. Основы физики полупроводниковых приборов. М., «Советское радио», 1963.
16. Каганов И. Л. Промышленная электротехника. М., Госэнергоиздат, 1961.
17. Полупроводники в технике релейной защиты. Кн. 1 и 2. М., НТОЭП, 1968.
18. Применение полупроводников в устройствах релейной защиты и системной автоматике. Под ред. И. И. Соловьева и А. М. Федосеева. М., «Высшая школа», 1962.
19. Барзилович В. М. Высоковольтные трансформаторы тока. Изд. 2-е. М., Госэнергоиздат, 1962.
20. Бачурин Н. И. Трансформаторы тока. М., «Энергия», 1964.
21. Инструкция по проверке трансформаторов тока, используемых в схемах релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1960.
22. Авербух А. М. и Рыбак Х. А. Задачи по релейной защите и методы их решения. М., Госэнергоиздат, 1961.

23. Атабеков Г. И. Теоретические основы релейной защиты высоковольтных сетей. М., Госэнергоиздат, 1957.

24. Голембиовский П. С., Гресь И. М., Малаховский Е. И., Мельник П. М., Минельников В. Я. Релейная защита и устройства автоматики на переменном токе. Киев, «Техника», 1964.

25. Опыт наладки релейной защиты на переменном оперативном токе в Мосэнерго. М., Госэнергоиздат, 1963.

26. Кожин А. И. Релейная защита линий 3—10 кВ на переменном оперативном токе. М., Госэнергоиздат, 1960.

27. Беркович М. А. и Семенов В. С. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. Изд. 5-е. М., «Энергия», 1972.

28. Наладка и эксплуатация блоков питания серий БП. М., «Энергия», 1964.

29. Мансуров Н. Н., Попов В. С. Теоретическая электротехника. М., «Энергия», 1968.

30. Плетнев Л. Ф. Реле прямого действия, их наладка и проверка. М., Госэнергоиздат, 1961.

31. Беркович М. А. и Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. М., «Энергия», 1971.

32. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. М., «Энергия», 1964.

33. Барзам А. Б. Общие вопросы учебного проектирования релейной защиты и автоматики. М., «Энергия», 1969.

34. Электрические сети и станции. Под ред. Л. Н. Баптиданова. М., Госэнергоиздат, 1963.

35. Воскресенский А. П. Токи небаланса в нулевом проводе трансформаторов тока. — «Электрические станции», 1950, № 2.

36. Лихачев Ф. А. Выбор, установка и эксплуатация дугогасящих аппаратов. М., Госэнергоиздат, 1955.

37. Сирота И. М. Защита от замыканий на землю в электрических системах. Изд-во АН УССР, 1955.

38. Сигнализация замыканий на землю в компенсированных сетях. Сб. статей под ред. В. И. Иоэльсона. М., Госэнергоиздат, 1962.

39. Дарченко В. Е., Степнов Т. В. Защита от замыканий на землю в компенсированных сетях. — «Электричество», 1956, № 2.

40. Кискачи В. М. Селективная чувствительная защита от замыканий на землю в сетях с малыми емкостными токами типа ДЗП-1. — «Электрические станции», 1966, № 3.

41. Попов И. Н. Чувствительное магнитное (бесконтактное) реле защиты. — «Труды ЦНИЭЛ», вып. 1. М., Госэнергоиздат, 1953.

42. Андреев В. А., Фабрикант В. Л. Релейная защита распределительных электрических сетей. М., «Высшая школа», 1965.

43. Руководящие указания по наладке, проверке и эксплуатации продольной дифференциальной защиты линий типа ДЗЛ. М., Госэнергоиздат, 1962.

44. Гаевенко Ю. А. Новые типы дистанционных защит линий электропередач. М., Госэнергоиздат, 1955.

45. Гаевенко Ю. А. Новые реле на полупроводниках. Киев, Государственное издательство технической литературы УССР, 1962.

46. Атабеков Г. И. Применение магнитоэлектрических и поляризованных реле в схемах релейной защиты. — «Электричество», 1956, № 7.

47. Левиуш А. И., Сапир Е. Д. Полупроводниковые реле сопротивления с эллиптической характеристикой срабатывания. — «Электричество», 1962, № 5.

48. Альтшуллер В. А., Карцев В. Л., Мурашко Н. В., Петров С. Я. Трехступенчатая дистанционная защита. — «Электрические станции», 1964, № 8.

49. Инструкция по наладке и проверке дистанционной защиты типа ПЗ-153. М., Госэнергоиздат, 1959.

50. Савостьянов А. И. Реле сопротивления КРС-131, КРС-132. М., «Энергия», 1969.

51. Мамонтов О. В. Методы кибернетики в теории электронных защит. М., 1962.
52. Гельман Г. А., Соскин Э. А. Бесконтактные элементы в схемах и устройствах автоматики. М., «Энергия», 1966.
53. Васильева Н. П. и Гашковец И. Логические элементы в промышленной автоматике. М., Госэнергоиздат, 1962.
54. Гиршберг В. В. и др. Транзисторные логические и функциональные элементы единой серии ЭТ для систем промышленной автоматики. — «Электротехника», 1965, № 4.
55. «Труды ЦНИИЭЛ», вып. 1, Госэнергоиздат, 1953.
56. «Труды ВНИИЭ», вып. XVI, Госэнергоиздат, 1963.
57. Руководящие указания по наладке, проверке и эксплуатации релейной части дифференциально-фазной высокочастотной защиты типа ДФЗ-2. М., Госэнергоиздат, 1957.
58. Микуцкий Г. В. Высокочастотные каналы релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1959.
59. Дальние электропередачи 500 кВ. Сб. статей под ред. А. М. Некрасова и С. С. Рокотяна. М., «Энергия», 1964.
60. Кочетов В. В., Сапир Е. Д., Якубсон Г. Г. Наладка и эксплуатация релейной части дифференциально-фазных высокочастотных защит линий 400—500 кВ. М., Госэнергоиздат, 1962.
61. «Труды ЦНИИЭЛ», вып. 2, Госэнергоиздат, 1954.
62. Голубев М. Л. Релейная защита и автоматика подстанций с короткозамыкателями и отделителями. М., «Энергия», 1965.
63. Гогайшвили П. Ф. Подстанции без выключателей на высшем напряжении. М., «Высшая школа», 1965.
64. Дорофеев В. И. Дифференциально-фазная высокочастотная и дифференциальная продольная защита на линиях с ответвлениями. — «Электрические станции», 1960, № 7.
65. Дроздов А. Д. Насыщающиеся трансформаторы тока с короткозамкнутыми витками для релейной защиты. — «Электричество», 1953, № 10.
66. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитным сердечником в релейной защите. М., «Энергия», 1965.
67. Царев М. И. Применение реле с быстроснабжающимися трансформаторами в дифференциальных защитах. — «Электрические станции», 1948, № 8.
68. Инструкция по наладке, проверке и эксплуатации дифференциальных реле типов РНТ-562 и РНТ-563. М., Госэнергоиздат, 1963.
69. Костров М. Ф., Соловьев И. И., Федосеев А. М. Основы техники релейной защиты. М., Госэнергоиздат, 1944.
70. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем. М., Госэнергоиздат, 1952.
71. Смертин Н. Т., Багинский Л. В., Хомутов Б. А. К вопросу о защите мощных турбогенераторов от токов обратной последовательности. — «Электрические станции», 1964, № 8.
72. Инструкция по проверке реле серии ДЗТ с магнитным торможением. М., «Энергия», 1965.
73. Грек Г. Т. и Рибель Н. Е. Защита от замыканий на корпус в электрических установках. — «Электрические станции», 1960, № 10.
74. Булитко Д. Д. Накладные трансформаторы тока. — «Электрические станции», 1957, № 8.
75. Сыромятников И. А. Режимы работы асинхронных двигателей. М., Госэнергоиздат, 1950.
76. Коваленский И. В. Релейная защита электродвигателей высокого напряжения. М., «Энергия», 1964.
77. Иржи Берман. Дифференциально-фазная защита шин в Чехословакии. — «Электрические станции», 1960, № 10.
78. Говсянчи Б. И. и Долидзе Г. Ф. Дифференциально-фазная защита сборных шин. — «Электрические станции», 1961, № 4.
79. Соколик Л. И. Дифференциально-фазная защита шин. — «Электрические станции», 1966, № 2.

80. Гельфанд Я. С., Голубев М. Л., Царев М. И. Релейная защита и электроавтоматика на переменном оперативном токе. М., «Энергия», 1973.
81. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 7. Дистанционная защита линий 35—330 кВ. М., «Энергия», 1966.
82. Гиришберг В. В. и др. Единая серия полупроводниковых логических и функциональных элементов (ЭТ). М., «Энергия», 1966.
83. Барзам А. Б. Системная автоматика. М., «Энергия», 1964.
84. Семенов В. А. О возможности повышения чувствительности продольной дифференциальной защиты генераторов. — «Электрические станции», 1958, № 6.
85. Инструкция по наладке и проверке релейной части дифференциально-фазной высокочастотной защиты ДФЗ-2. М., «Энергия», 1966.
86. Релейная защита и автоматика энергосистем. М., «Энергия», 1966.
87. Фабрикант В. Л., Глухов В. П., Паперно Л. Б. Элементы устройств релейной защиты и автоматика энергосистем и их проектирование. М., «Высшая школа», 1974.
88. Казанский В. Е. Трансформаторы тока в схемах релейной защиты. М., «Энергия», 1969.
89. Вавин В. Н. Трансформаторы тока. М., «Энергия», 1966.
90. Вавин В. Н. Трансформаторы напряжения и их вторичные цепи. М., «Энергия», 1967.
91. Кожин А. Н., Рубинчик В. А. Релейная защита линий с ответвлениями. М., «Энергия», 1967.
92. Гусев В. С., Соколов Р. Н. Блокировка защит линий 330—750 кВ при нарушениях в цепях напряжения. — «Электрические станции», 1967, № 6.
93. Федосеев М. А. Вопросы защиты мощных синхронных генераторов от сверхтоков при несимметричных режимах. — «Труды ВНИИЭ», вып. XXVI. М., «Энергия», 1966.
94. Лысенко Е. В. Токовая защита обратной последовательности для мощных генераторов. — В кн.: Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. Вып. 1. М., «Энергия», 1968.
95. Атабеков Г. И. Основы теории цепей. М., «Энергия», 1969.
96. Карцев В. Л. Дистанционная защита для линий 110—330 кВ с использованием магнитоэлектрических реле. — В кн.: Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. Вып. 1. М., «Энергия», 1968.
97. Федорова М. Ф. Дистанционные защиты с магнитоэлектрическим реле для сетей с малым током замыкания на землю. — В кн.: Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. Вып. 1. М., «Энергия», 1968.
98. Коковин В. Е. Фильтры симметричных составляющих в релейной защите. М., «Энергия», 1968.
99. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 6. М., «Энергия», 1966.
100. Правила технической эксплуатации станций и сетей. М., «Энергия», 1968.
101. Какуевецкий Л. И. и Смирнова Т. В. Справочник реле защиты и автоматики. М., «Энергия», 1972.
102. Голубев М. Л. Расчет уставок реле защиты и предохранителей. М., «Энергия», 1969.
103. Эксплуатационный циркуляр № Э-11/65. Изд. БТИ ОРГРЭС, 1966.
104. Грек Г. Т. и Петров С. Я. Дифференциальная защита шин с торможением. — «Электричество», 1970, № 10.
105. Дорогунцев В. Г., Овчаренко Н. И. Элементы устройств автоматики энергосистем. М., «Энергия», 1970.
106. Буль Б. К. и др. Основы теории электрических аппаратов. М., «Высшая школа», 1970.
107. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. М., «Энергия», 1972.

108. Диковский Я. М. и Кастратов И. И. Магнито-управляемые контакты. М., «Энергия», 1970.
109. Ермоленко В. М., Федосеев А. М. Современная релейная защита. Переводы докладов Международной конференции по Большим электрическим системам. М., «Энергия», 1970.
110. Фабрикант В. А., Андреев В. А., Бондаренко Е. В. Задачник по релейной защите. М., «Высшая школа», 1971.
111. Кискачи В. М. Использование гармоник э. д. с. генераторов энергоблоков при выполнении защиты от замыканий на землю. — «Электричество», 1974, № 2.
112. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Ч. 1 и 2. М., «Энергия», 1973.
113. Смирнов Э. П. Об особенностях техники надежности релейной защиты. — «Электричество», 1968, № 8.
114. Байтер И. И. Релейная защита и автоматика питающих элементов собственных нужд тепловых электростанций. М., «Энергия» 1968.
115. Вайнштейн Р. А. и др. Стопроцентная защита от замыканий на землю обмотки статора гидрогенераторов Красноярской ГЭС. — «Электрические станции», 1972, № 2.
116. Черников Г. Б. и Алимшиев В. С. Защита блочного синхронного генератора от замыканий на землю. — «Электрические станции», 1974, № 4.
117. Ласло Пазманди. Защита от замыкания на землю в обмотке статора генератора, работающего в блоке с трансформатором. — «Электричество», 1971, № 9.
118. Кудрявцев А. А. и др. Комплексное устройство защиты с магнитными трансформаторами тока для установок 35—220 кВ. — «Электрические станции», 1972, № 2.
119. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 8. Поперечная дифференциальная направленная защита линий 35—220 кв. М., «Энергия», 1970.
120. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 9. Дифференциально-фазная высокочастотная защита линий 110—330 кв. М., «Энергия», 1972.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие к пятому изданию	3
Г л а в а п е р в а я. Общие понятия о релейной защите	5
1-1. Назначение релейной защиты	5
1-2. Повреждения в электроустановках	6
1-3. Ненормальные режимы	10
1-4. Основные требования, предъявляемые к релейной защите	11
1-5. Элементы защиты, реле и их разновидности	16
1-6. Способы изображения реле и схем защиты на чертежах	18
1-7. Способы включения реле на ток и напряжение сети	19
1-8. Способы воздействия защиты на выключатель	19
1-9. Источники оперативного тока	21
Г л а в а в т о р а я. Реле	26
2-1. Общие принципы выполнения реле	26
2-2. Электромеханические реле	27
2-3. Электромагнитные реле	28
2-4. Электромагнитные реле тока и напряжения	36
2-5. Электромагнитные промежуточные реле	38
2-6. Указательные реле	44
2-7. Реле времени	45
2-8. Поляризованные реле	48
2-9. Индукционные реле	50
2-10. Индукционные реле тока и напряжения	53
2-11. Токовое индукционное реле серии РТ-80 и РТ-90	57
2-12. Индукционные реле направления мощности	59
2-13. Магнитоэлектрические реле	66
2-14. Реле с использованием полупроводников	67
2-15. Реле на выпрямленном токе, реагирующие на одну электрическую величину	69
2-16. Реле на выпрямленном токе, сравнивающие абсолютные значения двух напряжений U_I и U_{II}	72
2-17. Реле на сравнении фаз двух электрических величин U_I и U_{II}	85
Г л а в а т р е т ь я. Трансформаторы тока и схемы соединений	98
3-1. Трансформаторы тока и их погрешности	98
3-2. Параметры, влияющие на уменьшение намагничивающего тока	103
3-3. Требования к точности трансформаторов тока, питающих релейную защиту	105
3-4. Выбор трансформаторов тока и допустимой вторичной нагрузки	108
3-5. Обозначение выводов обмоток трансформаторов тока и векторные диаграммы	111
3-6. Новые устройства для получения информации о первичном токе	112
	675

3-7.	Типовые схемы соединений трансформаторов тока	114
3-8.	Нагрузка трансформаторов тока	125
3-9.	Фильтры симметричных составляющих токов	127
Г л а в а	ч е т в е р т а я . Максимальная токовая защита	131
4-1.	Принцип действия токовых защит	131
4-2.	Защита линий с помощью максимальной токовой защиты	132
4-3.	Схемы защиты	133
4-4.	Поведение максимальной защиты при двойных замыканиях на землю	138
4-5.	Выбор тока срабатывания защиты	140
4-6.	Выдержка времени защиты	143
4-7.	Максимальная токовая защита с пуском (блокировкой) от реле минимального напряжения	146
4-8.	Максимальные защиты на переменном оперативном токе	149
4-9.	Максимальная защита с реле прямого действия	161
4-10.	Общая оценка и область применения максимальной токовой защиты	163
Г л а в а	п я т а я . Токовые отсеки	163
5-1.	Принцип действия токовых отсеков	163
5-2.	Схемы отсеков	164
5-3.	Отсеки мгновенного действия на линиях с односторонним питанием	165
5-4.	Неселективные отсеки	167
5-5.	Отсеки на линиях с двусторонним питанием	168
5-6.	Отсеки с выдержкой времени	169
5-7.	Токовая трехступенчатая защита	170
5-8.	Оценка токовых отсеков	171
Г л а в а	ш е с т а я . Трансформаторы напряжения и схемы их соединений	171
6-1.	Основные сведения	171
6-2.	Погрешности трансформатора напряжения	172
6-3.	Схемы соединений трансформаторов напряжения	174
6-4.	Повреждения в цепях трансформаторов напряжения и контроль за их исправностью	179
6-5.	Емкостные делители напряжения	185
6-6.	Фильтр напряжения обратной последовательности	185
Г л а в а	с е д ь м а я . Токовая направленная защита	188
7-1.	Необходимость направленной защиты в сетях с двусторонним питанием	188
7-2.	Схема и принцип действия токовой направленной защиты . . .	191
7-3.	Схемы включения реле направления мощности	192
7-4.	Поведение реле мощности, включенных на ток неповрежденной фазы	196
7-5.	Блокировка максимальной направленной защиты при замыканиях на землю	199
7-6.	Выбор уставок защиты	200
7-7.	Мертвая зона	203
7-8.	Токовые направленные отсеки	204
7-9.	Краткая оценка токовых направленных защит	205
Г л а в а	в о с ь м а я . Защита от замыканий на землю в сети с большим током замыкания на землю	206
8-1.	Общие сведения	206
8-2.	Максимальная токовая защита нулевой последовательности . .	209
8-3.	Токовые направленные защиты нулевой последовательности . .	214
8-4.	Отсеки нулевой последовательности	220

8-5.	Ступенчатая защита нулевой последовательности	225
8-6.	Питание поляризующей обмотки реле мощности нулевой последовательности от трансформаторов тока	226
8-7.	Оценка и область применения защиты	228
Глава девятая. Защита от замыканий на землю в сети с малым током замыкания на землю		228
9-1.	Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю	228
9-2.	Основные требования к защите	233
9-3.	Принципы выполнения защиты от замыканий на землю	235
9-4.	Токовые защиты, реагирующие на емкостный ток сети и на искусственно созданные токи нулевой последовательности	236
9-5.	Направленная защита	246
9-6.	Защиты, реагирующие на высшие гармоники тока компенсированной сети	247
9-7.	Защиты, реагирующие на токи неуставовившегося режима	248
Глава десятая. Дифференциальная защита линий		250
10-1.	Назначение и виды дифференциальных защит	250
10-2.	Принцип действия продольной дифференциальной защиты	251
10-3.	Токи небаланса в дифференциальной защите	255
10-4.	Общие принципы выполнения продольной дифференциальной защиты линий	259
10-5.	Устройство контроля исправности соединительных проводов	265
10-6.	Продольная дифференциальная защита линий типа ДЗЛ	268
10-7.	Оценка продольной дифференциальной защиты	274
10-8.	Принцип действия и виды поперечных дифференциальных защит параллельных линий	274
10-9.	Токовая поперечная дифференциальная защита	275
10-10.	Направленная поперечная дифференциальная защита	278
10-11.	Направленная поперечная дифференциальная защита нулевой последовательности	289
10-12.	Направленная поперечная дифференциальная защита с раздельными комплектами от междуфазных и однофазных к. з.	290
10-13.	Способы повышения чувствительности пусковых органов поперечной дифференциальной защиты	291
10-14.	Оценка направленных поперечных дифференциальных защит	292
10-15.	Токовая балансная защита [Л. 42]	292
Глава одиннадцатая. Дистанционная защита		292
11-1.	Назначение и принцип действия	292
11-2.	Характеристики выдержки времени дистанционных защит	294
11-3.	Элементы и упрощенная схема дистанционной защиты	295
11-4.	Характеристики срабатывания дистанционных реле и их изображение на комплексной плоскости	297
11-5.	Принципы выполнения реле сопротивления и основные требования к их конструкциям	303
11-6.	Реле сопротивления на выпрямленном токе, выполняемые с помощью полупроводниковых приборов	304
11-7.	Электромеханические реле сопротивления	317
11-8.	Точность работы реле сопротивления и ток точной работы	329
11-9.	Дистанционные органы защиты	330
11-10.	Упрощенные схемы с уменьшенным числом дистанционных органов	336
11-11.	Причины, искажающие работу дистанционных органов	339
11-12.	Пусковые органы дистанционной защиты	342
11-13.	Схемы дистанционных защит	350
11-14.	Схемы защит на полупроводниках	354

11-15.	Выбор уставок дистанционной защиты	372
11-16.	Краткие выводы	378
Глава	двенадцатая. Высокочастотные защиты	379
12-1.	Назначение и виды высокочастотных защит	379
12-2.	Принцип действия направленной защиты с высокочастотной блокировкой	380
12-3.	Высокочастотная часть защиты	382
12-4.	Направленная защита с высокочастотной блокировкой	385
12-5.	Разновидности направленных высокочастотных защит и их схемы	390
12-6.	Дифференциально-фазная высокочастотная защита	394
12-7.	Дифференциально-фазная высокочастотная защита типа ДФЗ-2	400
12-8.	Выбор уставок дифференциально-фазной высокочастотной защиты	408
12-9.	Оценка высокочастотных защит	411
Глава	тринадцатая. Предотвращение неправильных действий защиты при качаниях	412
13-1.	Характер изменения тока, напряжения и сопротивления на зажимах реле при качаниях	412
13-2.	Поведение защиты при качаниях	415
13-3.	Меры по предотвращению неправильных действий защиты при качаниях	417
13-4.	Устройство блокировки защиты при качаниях, реагирующее на ток или напряжение обратной последовательности	418
13-5.	Устройство блокировки защиты при качаниях, реагирующее на скорость изменения тока, напряжения или сопротивления	425
Глава	четырнадцатая. Защита линий сверхвысокого напряжения и защита линий с ответвлениями	427
14-1.	Защита линий сверхвысокого напряжения	427
14-2.	Защита линий с ответвлениями	438
Глава	пятнадцатая. Защита генераторов	446
15-1.	Повреждения и ненормальные режимы работы генераторов, основные требования к защите генераторов	446
15-2.	Защита от междофазных коротких замыканий в обмотке статора	455
15-3.	Защита от замыканий между витками одной фазы	469
15-4.	Защита от замыкания обмотки статора на корпус (на землю)	474
15-5.	Защита от сверхтоков при внешних к. з. и перегрузках	489
15-6.	Защита гидрогенераторов от повышения напряжения	505
15-7.	Защита ротора	506
15-8.	Полная схема защиты генератора	514
15-9.	Защита синхронных компенсаторов	515
Глава	шестнадцатая. Защита трансформаторов и автотрансформаторов	517
16-1.	Повреждения и ненормальные режимы работы трансформаторов и автотрансформаторов, виды защит и требования к ним	517
16-2.	Защита от сверхтоков при внешних коротких замыканиях	522
16-3.	Защита от перегрузки	534
16-4.	Токовая отсечка	537
16-5.	Дифференциальная защита	539
16-6.	Токи небаланса в дифференциальной защите трансформаторов и автотрансформаторов	545

16-7.	Токи намагничивания силовых трансформаторов и автотрансформаторов при включении под напряжение	549
16-8.	Схемы дифференциальных защит	552
16-9.	Краткая оценка дифференциальных защит трансформаторов	565
16-10.	Газовая защита трансформаторов	566
16-11.	Токовая защита от замыканий на корпус (кожух) трансформатора	572
16-12.	Особенности защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения	573
16-13.	Защита вольтодобавочных регулировочных трансформаторов	580
Глава семнадцатая. Защита блоков генератор — трансформатор и генератор — трансформатор — линия		584
17-1.	Особенности защиты блоков	584
17-2.	Защита блока генератор — трансформатор	586
Глава восемнадцатая. Защита электродвигателей		610
18-1.	Общие требования к защите электродвигателей	610
18-2.	Основные виды защит, применяемых на электродвигателях	611
18-3.	Некоторые свойства асинхронных электродвигателей	612
18-4.	Защита электродвигателей от коротких замыканий между фазами	616
18-5.	Защита электродвигателей от замыканий одной фазы на землю	619
18-6.	Защита электродвигателей от перегрузки	619
18-7.	Защита электродвигателей от понижения напряжения	624
18-8.	Защита электродвигателей напряжением ниже 1000 В	627
18-9.	Расчет токов самозапуска электродвигателей и остаточного напряжения на их зажимах	629
18-10.	Защита синхронных электродвигателей	632
Глава девятнадцатая. Защита сборных шин		637
19-1.	Виды защит шин и требования к ним	637
19-2.	Дифференциальная защита шин	639
19-3.	Мероприятия по повышению надежности дифференциальной защиты шин	641
19-4.	Ток срабатывания дифференциальной защиты шин с реле, включенными через БНТ [Л. 4]	644
19-5.	Разновидности схем дифференциальной защиты шин [Л. 4]	644
19-6.	Оценка дифференциальной защиты шин и область ее применения	649
19-7.	Неполная дифференциальная защита шин	649
19-8.	Защита шин при помощи токовой отсечки	651
19-9.	Дистанционная защита шин	651
19-10.	Защита шин 110—500 кВ с трансформаторами тока, имеющими повышенную погрешность	652
Глава двадцатая. Резервирование действия релейной защиты и выключателей		656
20-1.	Необходимость и способы резервирования	656
20-2.	Принципы выполнения устройства резервирования отказа выключателей (УРОВ)	660
20-3.	Оценка устройств резервирования	664
Приложение		665
Список литературы		670

НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ ЧЕРНОБРОВОВ
РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Редактор издательства *И. П. Березина*
Переплет художника *Е. В. Никитина*
Технический редактор *Л. М. Кузнецова*
Корректор *Г. А. Полонская*

Сдано в набор 29/V 1974 г. Подписано к печати 23/X 1974 г. Т-18313. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 3. Печ. л. 42,5. Уч.-изд. л. 48,03. Тираж 100 000 экз. Зак. 1473. Цена 1 р. 74 к.

Издательство «Энергия», Москва, М-114.
Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградское производственно-техническое объединение «Печатный Двор» имени А. М. Горького Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли, 197136, Ленинград, П-136, Гатчинская ул., 26.