

Н. В. ЧЕРНОБРОВОВ

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА

Книжку
отсканировал
Чернышев Е.М.
Предоставил,
естественно
любезно,
Горбатов Д.С.

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 получать оптимальное решение очень

Чернобровов Н. В.

Ч.49 Релейная защита. Учебное пособие для техникумов. Изд. 5-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1974. 680 с. с ил.

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

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

Ч 30311-001
051(01)-74 75-74

6П2.11

© Издательство «Энергия», 1974 г.

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, актуальное 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 редактору книги Т. Н. Дорониной за ряд полезных замечаний. Все пожелания и замечания автор просит направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая набережная, 10, Издательство «Энергия».

Автор

ГЛАВА ПЕРВАЯ

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 расстройства 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,

спадать ток при его возрастании, понижать напряжение при его увеличении и т. д.).

В связи с этим возникает необходимость в создании и применении автоматических устройств, выполняющих указанные операции по защите системы и ее элементов от опасных последствий повреждений и ненормальных режимов.

Первоначально в качестве подобной защиты применялись планки 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 в оборудование (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, ураганым ветром, плеской 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

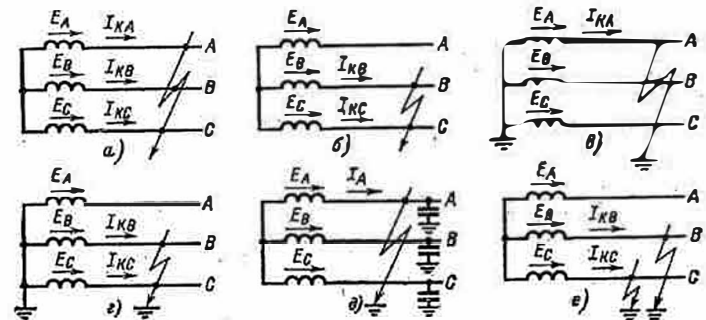


Рис. 1-1. Виды повреждений в электрических установках.

а, б, в и г — трехфазное, двухфазное, однофазное и двухфазное на землю к. з.; а и в — замыкание одной фазы на двух фаз на землю в сети с нейтральной изоляцией.

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. 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) $U_M = E - I_{\text{кз}} z_M$, где 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.

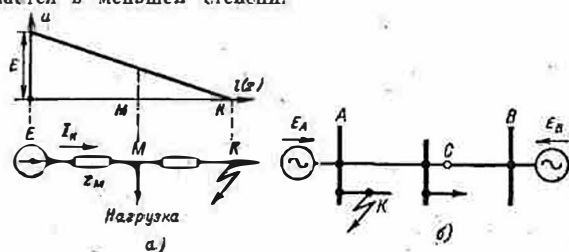


Рис. 1-2. Влияние понижения напряжения при к. з.
а — на работу потребителей; б — на энергосистему.

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

а) Ток к. з. $I_{\text{кз}}$ согласно закону Джоуля—Ленца выделяет в активном сопротивлении r цепи, по которой он проходит в течение времени t , тепло $Q = k I_{\text{кз}}^2 r t$.

В месте повреждения это тепло и пламя электрической дуги производят большие разрушения, размеры которого тем больше, чем больше ток $I_{\text{кз}}$ и время t .

Проходя по неповрежденному оборудованию и линиям электропередачи, ток к. з. $I_{\text{кз}}$ нагревает их выше допустимого предела, что может вызвать повреждение изоляции и токоведущих частей.

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

Основными потребителями электроэнергии являются асинхронные электродвигатели. Момент вращения двигателей M_d пропорционален квадрату напряжения U на их зажимах: $M_d = k U^2$.

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 турбины уравновешивается 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 становится 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 турбогенератора станции A .

В этих 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 разгрузились, 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 частоты вращения асинхронных электродвигателей уменьшается.

Если скольжение превысит 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 по 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_d поврежденной фазы A не шунтируется появившимся в точке K соединением с землей. Возникающий при этом ток I_d 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. Но м и н а л ь н ы м называется максимальный ток, допускаемый для данного оборудования в течение неограниченного времени.

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) А и В (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 А и В, 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 С, назы-

ваемой электрическим центром качаний, оно снижается до нуля, в остальных точках сети напряжение падает, но остается больше нуля, нарастая от центра качания С к источникам питания А и В. 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. Разгруженный 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 емкостью проводимости.

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.

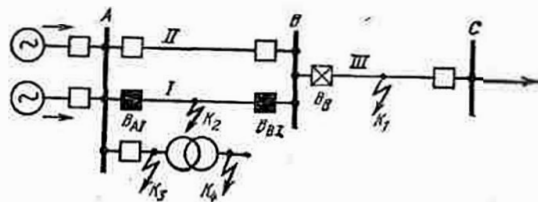


Рис. 1-4. Селективное отключение поврежденного участка при к. з. в сети

На рис. 1-4 показаны примеры селективного отключения поврежденных. Так, при к. з. в точке К₂ защита должна отключить поврежденную линию выключателем ВД, т. е. выключателем, ближайшим к месту повреждения. При этом все потребители, кроме питающихся 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 разрушений 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 междофазных 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 повышения 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 устройства электроустановок (ПУЭ) [1, 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 времени 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 дальним резервированием. Оно необходимо для отключения к. з. в том случае, если защита II или выключатель участка ВС не работает 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 приводит 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 обеспечивать их надежную работу в пределах первого участка. Для обеспечения резервирования второго участка в этом случае устанавливается дополнительная защита, называемая резервной.

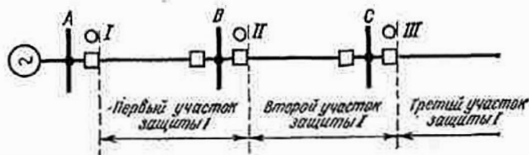


Рис. 1-5. Зоны действия защиты.

Каждая защита должна действовать не только при металллическом 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 наименьшие величины, на которую реагирует защита (ток, напряжение и т. п.), будут 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_q . Для защит, реагирующих на ток к. з.,

$$k_q = \frac{I_{н. мин}}{I_{с. а}} \quad (1-1)$$

где $I_{н. мин}$ — минимальный ток к. з.; $I_{с. а}$ — 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-

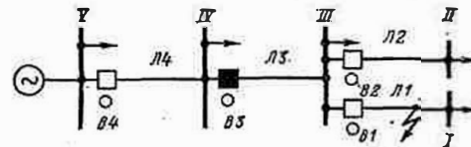


Рис. 1-6. Несеλεκтивное отключение к. з. из-за отказа защиты.

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 общие принципы выполнения релейной защиты регламентируются ПУЭ [Л. 1], типовые схемы релейной защиты и их расчет — «Руководящими указаниями по релейной защите» [Л. 2-6].

II. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЩИТАМ ОТ НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Эти защиты, так же как и защиты от к. з., должны обладать селективностью, достаточной чувствительностью и надежностью. Но быстроты действия от этих защит, как правило, не требуется.

Время действия защиты от ненормальных режимов зависит от характера режима и его последствий. Часто ненормальные режимы носят кратковременный характер и ликвидируются сами.

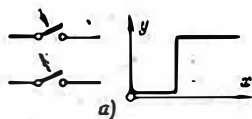
например кратковременная перегрузка при пуске асинхронного электродвигателя. В таких случаях быстрое отключение не только не является необходимым, но может причинить ущерб потребителям. Поэтому отключение оборудования при ненормальном режиме должно производиться только тогда, когда наступает действительная 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.



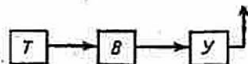
а)



б)



в)



г)

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 подразделением защитных устройств реле также делится 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 максимумами, а реле, работающие при снижении этой величины, называются минимумами.

Для защиты от ненормальных режимов, так же как и для защиты 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, применяются 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 (токового 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, такое реле не имеет 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 раздельно 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 раздельно, 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 изложены все схемы изображаются в соответствии с этим стандартом. Положение контактов реле на схемах условилось 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, преимущественно которых по сравнению с первичными состоит 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 одну 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, малых 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.

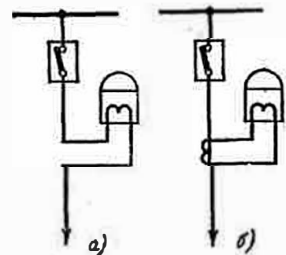


Рис. 1-8. Способы включения токовых реле.
а — первичных; б — вторичных.

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 $F_{\text{д}}$, создаваемая обмоткой реле, станет больше силы $F_{\text{п}}$ 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, притягиваясь, 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 цепей, в которой проходит ток катушки отключения, предусмотрен вспомогательный блокировочный контакт БК, который размыкает цепь катушки отключения еще до того, как начнут размыкаться контакты реле.

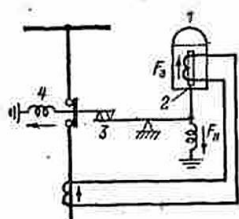


Рис. 1-9. Вторичное реле прямого действия.

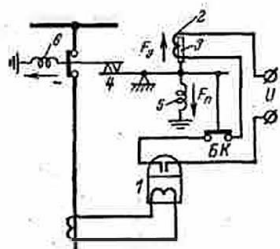


Рис. 1-10. Вторичное реле косвенного действия.

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 секционируется на несколько участков, имеющих самостоятельное питание от сборных шин батарей.

Самым ответственным участком являются цепи защиты, автоматизации 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 цепей контролируется с помощью специальных устройств.

Исправность предохранителей контролируется реле РС (рис. 1-11). Целость цепи отключения КО и блок-контакты БК обычно контролируются реле РК, дающими 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 КО 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 $РК$, как показано на рис. 1-11.

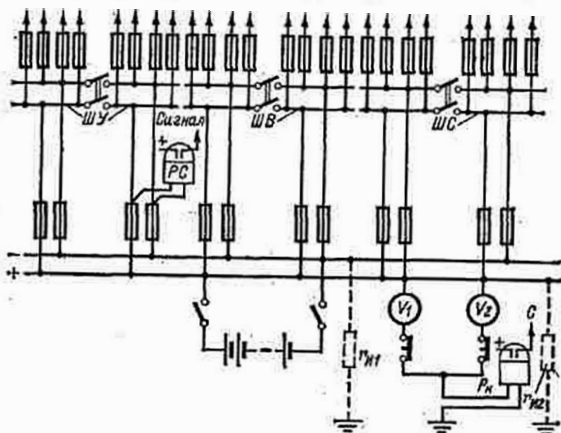


Рис. 1-11. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты, цепей управления и сигнализации постоянным током.

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

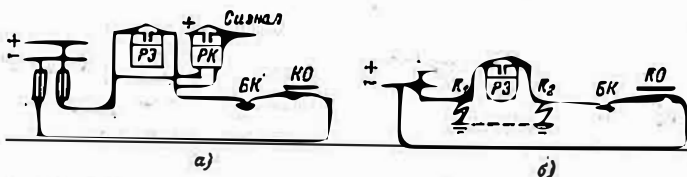


Рис. 1-12. Цепи отключения выключателя.

а — контроль целостности цепи с помощью последовательно включенного реле (РК); б — образование дупльной цепи на отключение выключателя при замыкании на землю в 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 получают 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 защиты 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 защиты от замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, защиты от витковых замыканий в трансформаторах и генераторах или защиты от таких ненормальных режимов, как повышение или понижение напряжения и понижение частоты.

Трансформаторы напряжения и трансформаторы собственных нужд непригодны для питания оперативных цепей защиты 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 глубоким понижением 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

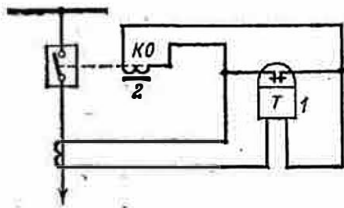


Рис. 1-13. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током непосредственно от трансформатора тока.

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 трансформатора 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 специально 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 раздельно, что позволяет применить 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 насыщенным. 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 повреждений и ненормальных режимов, и в то же время позволяет иметь на выключателе только одну катушку отключения.

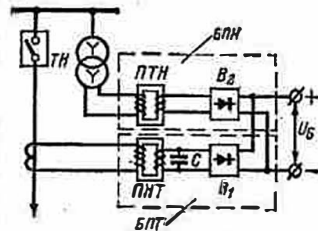


Рис. 1-14. Принципиальная схема комбинированного блока питания для питания оперативных цепей защиты выпрямленным переменным током.

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 защиты. 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-

ключать к питающей линии $Л1$. При включении $Л1$ со стороны питающей подстанции A трансформатор 1 получает напряжение, после чего появляется возможность проведения операций на подстанции B , не имеющей напряжения.

Схема с питанием от заряженного конденсатора. На рис. 1-16 дана упрощенная схема питания оперативных цепей от заряженного конденсатора. Конденсатор 1 питается от трансформатора напряжения через выпрямитель 2 . В нормальном режиме конденсатор заряжен. При действии защиты он замыкается на катушку отключения, питаемая током разряда.

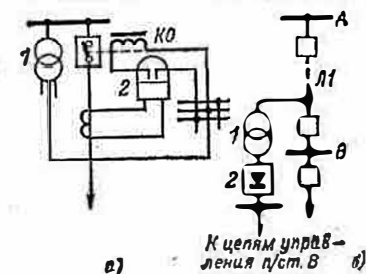


Рис. 1-15. Схема питания оперативных цепей от трансформатора напряжения (а) или трансформатора собственных нужд (б).

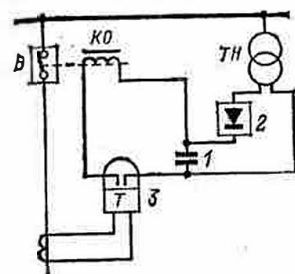


Рис. 1-16. Принципиальная схема питания оперативных цепей защиты переменным током с использованием энергии заряженного конденсатора.

Рассмотренные схемы питания оперативных цепей от источников переменного тока отличаются простотой и достаточной надежностью [Л. 8]. Однако вопросы применения оперативного переменного тока для сложных защит мощных выключателей, а также на больших электростанциях и подстанциях еще недостаточно разработаны, что и ограничивает применение источников переменного тока.

В СССР питание оперативных цепей от источников переменного тока получило широкое применение в электрических сетях 6, 10 и 35 кВ и отчасти 110 кВ [Л. 24, 80].

ГЛАВА ВТОРАЯ РЕЛЕ

2-1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ

В схемах релейной защиты и электрической автоматики применяются электромеханические реле, реле на полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) и реле с использованием насыщающихся магнитных систем. Значительное распространение пока имеют электромеханические реле.

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 подразделять на три группы:

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

реле, реагирующие на две электрические величины: ток и напряжение сети для два напряжения U_1 и U_2 , каждое из которых является линейной функцией тока и напряжения сети;

реле, реагирующие на три или больше электрические величины, например: три тока в 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 защитам.

2-2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

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

пом 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 защиты. 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 , характеризующую 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 (н. 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.

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

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

Магнитный поток Φ и создающий его ток I_p связаны соотношением

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

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

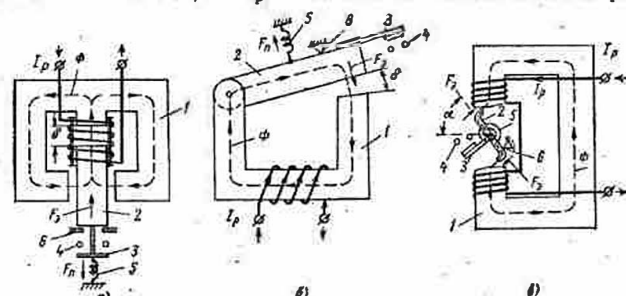


Рис. 2-1. Типы электромагнитных реле.

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

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

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

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

$$M_p = F_p l_p = k'' I_p^2, \quad (2-4)$$

где l_p — плечо силы F_p .

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_p или ее момент M_p 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, а) — 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 воздушного зазора $R_m = \delta / 4\pi\mu$. 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 $R_m = f(\delta)$, $F_a = f(\delta)$ 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, меняющегося 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_p , трения и массы F_T или соответствующие моменты M_p и M_T . Реле начинает действовать, когда

$$F_a = F_{a, c.p.} = F_p + F_T \text{ или } M_a = M_{a, c.p.} = M_p + M_T. \quad (2-7)$$

Величинам $F_{a, c.p.}$ и $M_{a, c.p.}$ соответствует определенный наименьший ток $I_{c.p.}$, необходимый для срабатывания.

Наименьший ток, при котором реле срабатывает, называется током срабатывания и обозначается $I_{c.p.}$

Подставляя в (2-4) $M_{a, c.p.}$ вместо M_a , находим ток

$$I_{c.p.} = I_{c.p.} = \frac{R_m}{w_p} \sqrt{\frac{M_{a, c.p.}}{k}}, \quad (2-8)$$

где $M_{a, c.p.} = M_p + M_T$.

В большинстве конструкций предусматривается возможность регулирования $I_{c.p.}$, которое, как это следует из (2-8), можно осуществлять путем изменения числа витков обмотки реле w_p , момента M_p противодействующей пружины, размера воздушного зазора δ с учетом, что $R_m = f(\delta)$.

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

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

Ток возврата. Возврат притянутого якоря в исходное положение при уменьшении тока и обмотке реле происходит под действием пружины F (рис. 2-1). Для возврата необходимо, чтобы момент M_p преодолел электромагнитный момент $M_{a, в.с.}$ и момент трения M_T .

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

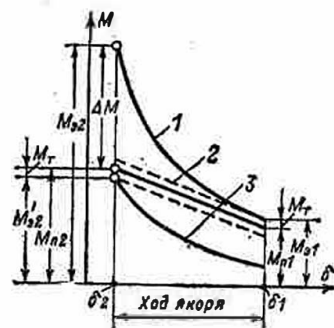


Рис. 2-3. Диаграмма электромагнитных и механических сил при срабатывании и возврате токового реле.
1 — $M_a = f(\delta)$ при $I_p = I_{c.p.} = \text{пост.}$
2 — $M_p = f(\delta)$; 3 — $M_T = f(\delta)$ при $I_p = I_{в.с.} = \text{пост.}$

спизия ток I_p до значения, при котором момент $M_{э2}$ уменьшится до $M'_{э2}$. Тогда момент пружины $M_{п2}$ преодолает электромагнитный момент $M'_{э2}$ и трения M_t и заставит якорь пернуться из положения δ_2 в начальное положение δ_1 . Условия возврата определяются уравнением (см. рис. 2-3)

$$M_{п2} = M'_{э2} + M_t, \quad (2-9)$$

где $M'_{э2}$ является наибольшим значением $M_{э}$, при котором начинается возврат реле; его называют моментом возврата $M_{э.воз.}$. Соответствующий ему ток I_p обозначается $I_{воз.}$, при этом токе обеспечивается условие возврата (2-9).

Таким образом, ток о м возврата реле $I_{воз.}$ называется наибольшим ток в реле, при котором якорь реле возвращается в начальное положение.

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

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

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

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

Предположим, что в обмотку электромагнитного реле (например, с коротким якорем — рис. 2-1, б) подали ток, равный току срабатывания. Возникающий при этом электромагнитный момент $M_{э1}$ преодолевает сопротивление пружины и трения ($M_{п1}$ и M_t) и приводит в движение якорь. Началу движения якоря соответствует соотношение моментов: $M_{э1} = M_{п1} + M_t$.

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 $M_{п1}$ (прямая 2) при этом парастает по линейному закону (обратно пропорционально изменению δ). Электромагнитный момент $M_{э}$ (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 $M_{э}$ по сравнению с $M_{п1}$ образуется избыточный момент $\Delta M = M_{э2} - M_{п2}$. Для возврата якоря необходимо уменьшить ток в обмотке реле от $I_{с.р.}$ до значения $I_{в.р.}$, при котором электромагнитный момент $M_{э}$ снизится от $M'_{э2} = k \frac{I_{с.р.}^2}{\delta_2^2}$ до $M'_{э1} = k \frac{I_{в.р.}^2}{\delta_1^2}$ (рис. 2-3).

При этом условии момент пружины $M_{п2}$ преодолевает электромагнитный момент $M'_{э1}$ и момент трения M_t , и якорь реле возвращается в начальное положение δ_1 .

Приведенная диаграмма моментов позволяет сделать вывод, что различие в значениях $I_{воз.}$ и $I_{с.р.}$ вызывается различием (идентичностью) характера изменения моментов $M_{э}$ 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 $I_{воз.}$ и $I_{с.р.}$, следовательно, меньше $k_{воз.}$.

Для улучшения коэффициента возврата необходимо обеспечить:

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

Улучшения $k_{воз.}$ 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 $k_{воз.}$ 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 $M_{э} > M_{п}$ 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 $M_{п} > M_{э} + M_t$, в результате чего якорь реле отойдет и контакты реле замкнутся.

Током срабатывания минимального реле называется наибольший ток, при котором отпадает якорь реле, а ток о м возврата — наименьший ток, при котором притягивается якорь реле.

Как и у максимальных реле, отношение $I_{воз.}$ к $I_{с.р.}$ называется коэффициентом возврата реле. У минимальных реле $I_{воз.} > I_{с.р.}$, поэтому $k_{воз.} > 1$.

г) Работа электромагнитного реле на переменном токе

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

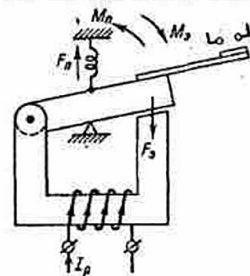


Рис. 2-4. Принцип устройства реле минимального тока при падении напряжения.

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

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

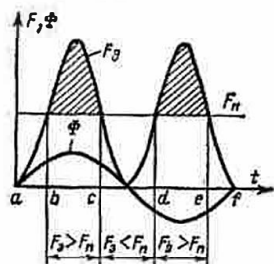


Рис. 2-5. Изменение силы притяжения якоря F_{Σ} электромагнитного реле при прохождении по его обмотке переменного тока.

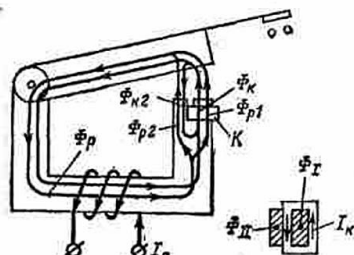


Рис. 2-6. Принципы устройства электромагнитного реле с короткозамкнутым витком.

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 $F_{\text{рез}} = F_{\Sigma} - F_n$ — F_n , 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 углавыми 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_K , созда-

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

Из-под сечения, охватываемого короткозамкнутым витком, выходит результирующий поток Φ_I , состоящий из части потока обмотки реле Φ_{p1} и потока Φ_K , проходящих через это сечение:

$$\Phi_I = \Phi_{p1} + \Phi_K. \quad (2-11)$$

Из-под сечения, не охватываемого короткозамкнутым витком, выходит магнитный поток Φ_{II} , состоящий из потока обмотки реле Φ_{p2} и части магнитного потока короткозамкнутого витка Φ_K :

$$\Phi_{II} = \Phi_{p2} - \Phi_K. \quad (2-12)$$

Построение диаграммы на рис. 2-7 начинается с вектора Φ_I . Затем строится э. д. с. E_K , наведенная в короткозамкнутом витке потоком Φ_I , отстающая от него на 90° . Ток в короткозамкнутом витке I_K почти совпадает с э. д. с. E_K вследствие малой индуктивности витка. Пренебрегая потерями на намагничивание, поток Φ_K показываем совпадающим с создающим его током I_K .

Зная Φ_I и Φ_K , из выражения (2-11) находим:

$$\Phi_{p1} = \Phi_I - \Phi_K.$$

Магнитный поток Φ_{p2} совпадает по фазе с потоком Φ_{p1} , так как они создаются одной и той же в. с. (I_{p1p2}) и имеют однородное магнитное сопротивление. На основании выражения (2-12) находится поток Φ_{II} .

Полученная векторная диаграмма (рис. 2-7) показывает, что магнитный поток Φ_I всегда сдвинут относительно потока Φ_{II} на угол ψ . Сдвиг по фазе магнитных потоков обусловлен наличием потока Φ_K .

Каждый из магнитных потоков (рис. 2-8) $\Phi_I = \Phi_{I\text{макс}} \sin \omega t$ и $\Phi_{II} = \Phi_{II\text{макс}} \sin (\omega t + \psi)$ создает силы $F_{\Sigma I}$ и $F_{\Sigma II}$, 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.

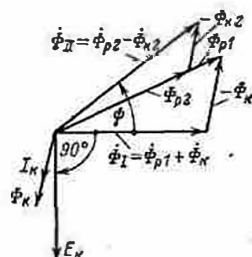


Рис. 2-7. Векторная диаграмма магнитных потоков реле на рис. 2-6.

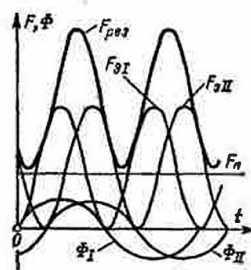


Рис. 2-8. Изменение силы притяжения якоря $F_{\text{рез}}$ у электромагнитного реле с короткозамкнутым витком при прохождении по его обмотке переменного тока.

Для устранения вибрации результирующая сила

$$F_{\text{рез}} = F_{01} + F_{02} = k_1 \Phi_1^2 \sin^2 \omega t + k_2 \Phi_2^2 \sin^2 (\omega t + \psi) \quad (2-12a)$$

должна в каждый момент времени превышать $F_{\text{в}}$. Наилучшие результаты получаются при $\psi = 90^\circ$ и $\Phi_1 = \Phi_{11}$; в этом случае $F_{\text{рез}}$ имеет постоянное значение, что следует из (2-12a).

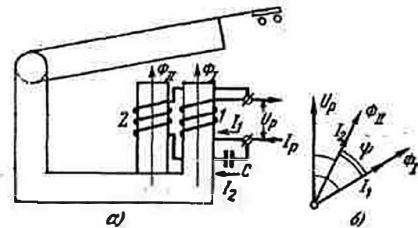


Рис. 2-9. Принцип устройства электромагнитного реле с расщепленным магнитопроводом. а — устройство реле; б — векторная диаграмма.

имеют различные сдвиги относительно напряжения U_p на зажимах реле. Построив векторную диаграмму (рис. 2-9, б) токов и напряжений, устанавливаем, что потоки Φ_1 и Φ_{11} 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 НАПРЯЖЕНИЯ

а) Токовые реле

При включении обмотки электромагнитного реле на ток сети непосредственно или через трансформаторы тока его электромагнитный момент $M_a = kI^2$. Такое реле называется токовым, так как его поведение зависит от тока сети I .

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 включения 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

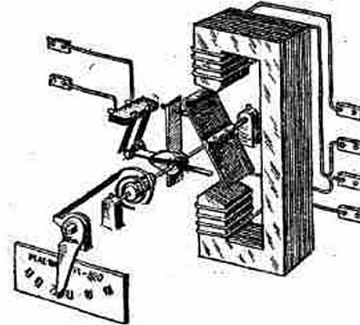


Рис. 2-10. Токовое электромагнитное реле типа ЭТ-520.

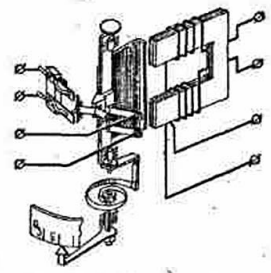


Рис. 2-11. Токовое электромагнитное реле типа РТ-40.

реле ЭТ. Потребление РТ-40 на минимальной установке 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_a .

Действительно, $M_a = kI_p^2$, по ток в реле $I_p = U_p/x_p$, где x_p — сопротивление обмотки реле; U_p — напряжение на зажимах реле.

Следовательно, $M_a = k'U_p^2$ или с учетом, что $U_p = U_a/n_n$, $M_a = k''U_a^2$. 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 уменьшают-

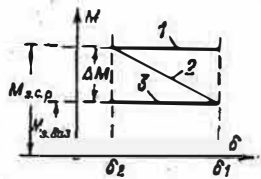


Рис. 2-12. Диаграмма электромагнитных и механических моментов при срабатывании и возврате реле напряжения.

1 — $M_a = f(\delta)$ при $U_p = U_p = \text{пост.}$; 2 — $M_m = f(\delta)$; 3 — $M_s = f(\delta)$ при $U_p = U_{\text{зад}} = \text{пост.}$

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.

Сопоставляя кривые $M_s = f_1(\delta)$ и $M_n = f_2(\delta)$ на рис. 2-12, легко видеть, что коэффициент возврата реле будет близким. Для понижения коэффициента возврата обмотки реле напряжению выполняются с преобладающим активным сопротивлением. Изменение реактивного сопротивления при таких условиях не оказывает заметного влияния на величину тока, и последний остается неизменным.

Тогда характер зависимости $M_s = f_1(\delta)$ 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 цепей с большим током.

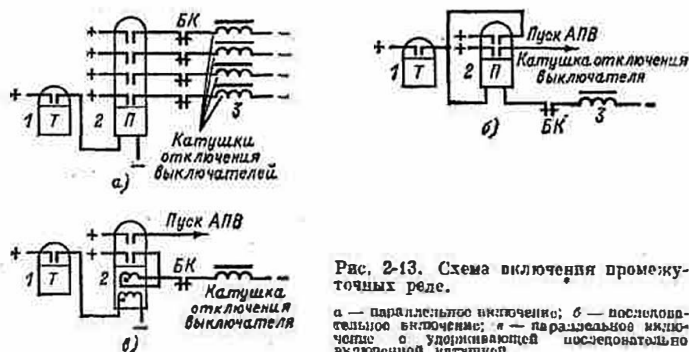


Рис. 2-13. Схема включения промежуточных реле.

а — параллельное включение; б — последовательное включение; в — параллельное включение с удвоением цепи последовательно включенной катушкой.

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 с управляемой катушкой реле цепь (рис. 2-13, в). Такое реле, действующее от кратковременного импульса, подающего в параллельно включенную обмотку, остается в сработавшем состоянии под действием тока удерживания, 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 и сопротивления обмотки этого реле, которое допускается не более 5—10% номинального напряжения источника оперативного тока.

Промежуточные реле должны надежно действовать не только при нормальном напряжении, но и при возможном в условиях эксплуатации его повышении, 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.

б) 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-

роков 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.

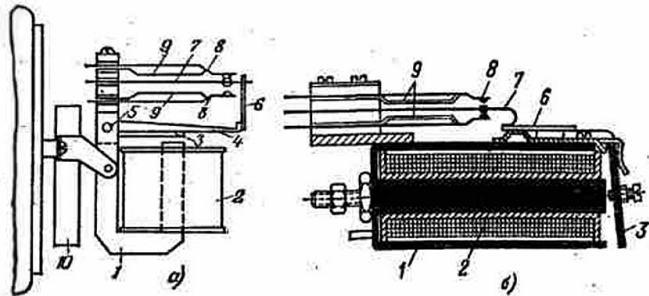


Рис. 2-14. Конструкция промежуточных реле.

а — тип РП-210; б — тип 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.

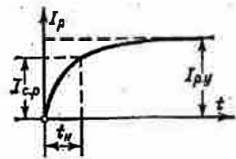


Рис. 2-15. Нарастание тока в обмотке промежуточного реле постоянного тока при замыкании ее цепи.

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_{cp} , 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_{cp} 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_{cp} , 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 $k = I_{p,y} / I_{cp}$.

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 магнитоприводе 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 магнитоприводе 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.

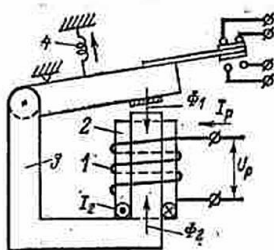


Рис. 2-16. Принцип устройства промежуточного реле замедленного действия.

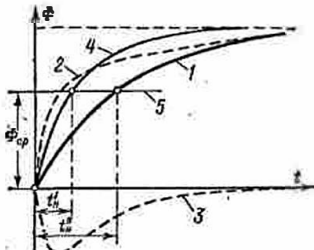


Рис. 2-17. Изменение магнитного потока Φ в обмотке промежуточного реле замедленного действия.

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.

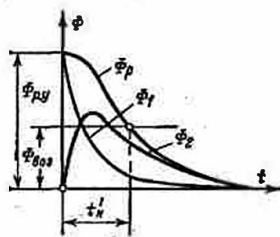


Рис. 2-18. Затухание магнитных потоков в магнитопроводе промежуточного реле замедленного действия при размыкании цепи его обмотки.

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.

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 падать магнитный поток Φ_2 . Через время t'_a магнитный поток Φ_p снизится до величины $\Phi_{пад}$; 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 отпадения реле равно $t'_n + t'_d$, при этом $t'_n \ll t'_d$.

Увеличение t'_n достигается уменьшением $\Phi_{воз}$, увеличением начального значения $\Phi_1 = \Phi_{р.у}$ (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 отпадании якоря реле следует уменьшать зазор (при втянутом якоря), увеличивать размеры гильз, намагничивающую силу обмотки 1 и ослаблять противодействующую пружину 4 (рис. 2-16).

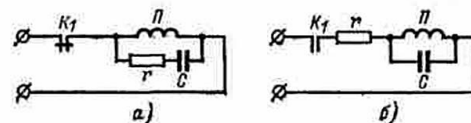


Рис. 2-19. Схема замедления действия промежуточных реле.

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

Отечественные заводы изготовляют реле типов РП-250, КДР-3 РЭВ-81, РЭВ-840, 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 повышение 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. Проворотно этому уменьшается и ток в обмотке Π .

По окончании заряда конденсатора прохождение тока I_c прекратится и на обмотке реле L установится нормальное напряжение $U_n = U - I_{пр}$. При размыкании контактов K , конденсатор C разряжается на обмотку реле L , удерживая реле в рабочем состоянии до тех пор, пока ток в обмотке не снизится до значения $I_{ров}$. 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 1, сигнализирующее действие защиты на отключение выключателя. При срабатывании защиты по обмотке реле 1 проходит ток, приводящий реле 1 в действие.

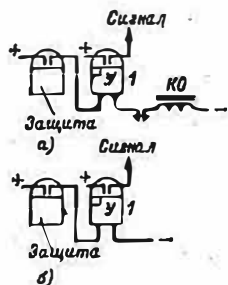


Рис. 2-20. Схемы включения указательных реле.
а — последовательного; б — параллельного.

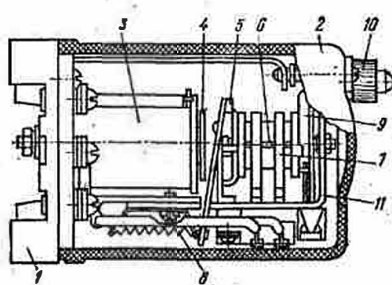


Рис. 2-21. Конструкция указательного реле типа РУ-21.
1 — конопли; 2 — катушка; 3 — катушка; 4 — сердечник; 5 — якорь; 6 — контактный мостик; 7 — контактные пластины; 8 — возвратная пружина; 9 — флажок; 10 — индикатор возврата; 11 — окошко.

Ввиду кратковременности прохождения тока в обмотке указательных реле они выполняются так, что сигнальный флажок и контакты реле остаются в рабочем 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 выдержкой в реле.

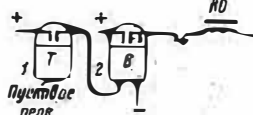


Рис. 2-22. Схема включения реле времени.

Основным требованием, предъявляемым к реле времени, применяемым в схемах релейной защиты, является точность. 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) Конструкция 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 вытягивается, 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

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

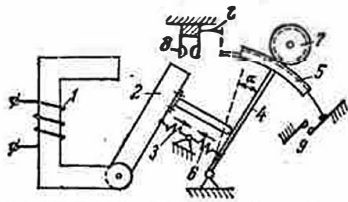


Рис. 2-23. Принцип устройства реле времени.

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 по расчитывается на длительное прохождение тока. Поэтому реле, предназначенные для длительного включения под напряжением, 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 сработанном состоянии.

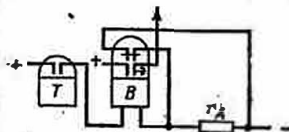


Рис. 2-24. Термически устойчивое реле времени.

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

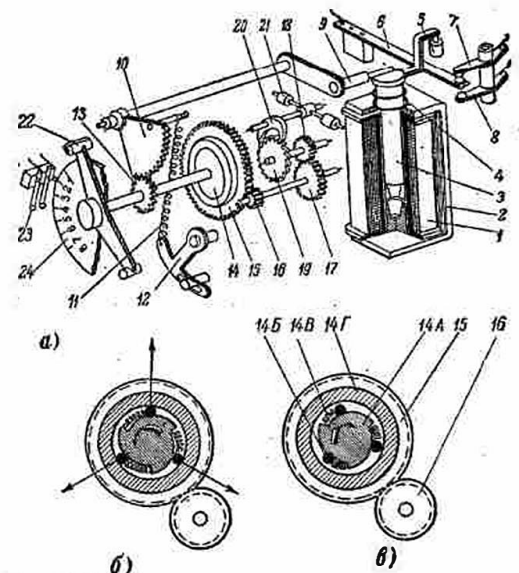


Рис. 2-25. Кинематическая схема реле времени типа ЭВ-110 (ЭВ-130) Чебоксарского электроаппаратного завода.

1 — обмотка; 2 — магнитопровод; 3 — якорь; 4 — возвратная пружина; 5 — подвижной магнитопровод; 6 — контакты; 7 — вал; 8 — зубчатый сектор; 9 — воздушная пружина; 10 — скоба для изменения натяжения пружины; 11 — зубчатое колесо; 12 — фрикционное сцепление (14А — звездочка; 14Б — шарики; 14В — пружина; 14Г — обмотка); 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).

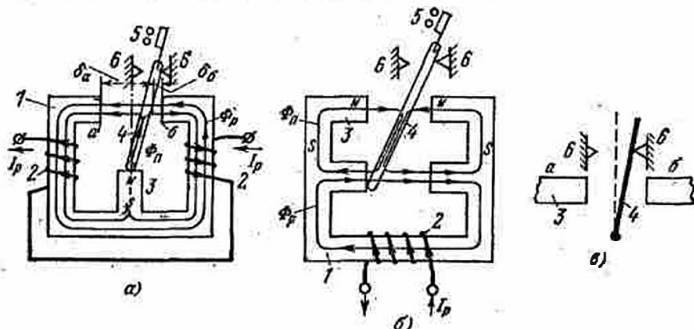


Рис. 2-26. Принцип устройства поляризованных реле.

а — с дифференциальной магнитной системой; б — с мостовой магнитной системой; 4 — шунтирующий регулятор 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 половинки 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, ответвляющаяся через якорь, не учитывается. В воздушном зазоре δ_a магнитные потоки Φ_{na} и Φ_p суммируются, а в δ_b вычитаются, образуя результирующие магнитные потоки:

$$\Phi_a = \Phi_{na} + \Phi_p \text{ и } \Phi_b = \Phi_{nb} - \Phi_p. \quad (2-15)$$

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 $F_b = k\Phi_b^2$, стремящаяся притянуть якорь к правому полюсу b .

При определенном токе $I_p \geq I_{c.p}$ магнитный поток Φ_a становится больше магнитного потока Φ_b , сила $F_a > F_b$ и якорь отклоняется влево, к полюсу a , замыкая контакты 5.

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_b их сумма. Тогда при $I_p \geq I_{c.p}$ поток $\Phi_b > \Phi_a$, сила $F_b > F_a$ 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 (полнрность).

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 6, ограничивающие ход якоря, устанавливаются так, чтобы при любом положении якоря преобладало влияние одного из полюсов, например правого б. Для этой цели зазор δ_a вент больше δ_b . Тогда при отсутствии тока I_p поляризующий магнитный поток $\Phi_{na} > \Phi_{nb}$, соответственно сила $F_a > F_b$ и якорь реле притягивается к правому упору под действием преобладающей силы F_b . 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 6 расположить симметрично по отношению к среднему положению якоря в зазоре (рис. 2-26, а), 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 котором 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 $(20 \div 50) I_{c.p. \text{ мин}}$, у обычных электромагнитных реле термическая кратность не превышает 1,5 $I_{c.p. \text{ мин}}$; 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 быстрого действия 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

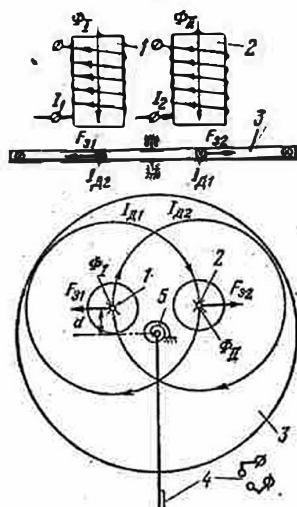


Рис. 2-27. Принцип устройства индукционного реле.

алюминиевого диска или цилиндр (барабанчик), 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. $E_{d1} = -\frac{d\Phi_I}{dt}$, аналогично поток Φ_{II} создает э. д. с. $E_{d2} = -\frac{d\Phi_{II}}{dt}$. 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_{d1} и E_{d2} в подвижной системе возникают вихревые токи I_{d1} и I_{d2} , замыкающиеся вокруг оси индуктирующего их магнитного потока. Положительные направления I_{d1} и I_{d2} , 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_{d1} , обусловленная взаимодействием магнитного потока Φ_I и тока I_{d1} , и F_{d2} , вызванная взаимодействием Φ_{II} с I_{d2} (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_{d1} и Φ_{II} и I_{d2} отсутствуют. Направление сил F_{d1} и F_{d2} для положительного значения потоков и токов определяется по правилу «левой руки» и показано на рис. 2-27. Можно доказать, что мгновенное значение сил F_{d1} и F_{d2} меняет свой знак в течение периода $T = 1/f$ 4 раза, поэтому поперечные реле (вращение подвижной системы) зависят от знака среднего значения сил F_{d1} и F_{d2} . Знак и направление каждой силы определяется углом сдвига фаз между магнитным потоком и взаимодействующим с ним током I_d . Силы F_{d1} и F_{d2} образуют результирующую электромагнитную силу F_d , равную их алгебраической сумме $F_d = F_{d1} + F_{d2}$. Результирующая сила F_d создает вращающий момент $M_d = F_d d$, где d — плечо силы F_d . Электромагнитная сила и момент (F_d и M_d) приводят в движение подвижную систему 3, которая в зависимости от знака M_d 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.

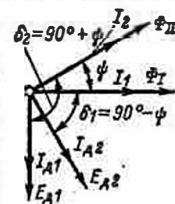


Рис. 2-28. Векторная диаграмма э. д. с., токов и магнитных потоков индукционного реле.

б) Электромагнитная сила и ее момент

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

$$F_d = k' / \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-16)$$

Соответственно электромагнитный момент

$$M_d = F_d d = k'' / \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-17)$$

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

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

$$F_0 = k\Phi I \cos \delta, \quad (2-18)$$

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

$$F_{01} = k_1 \Phi_1 I_{12} \cos \delta_1; \quad (2-19)$$

$$F_{02} = k_2 \Phi_1 I_{12} \cos \delta_2. \quad (2-20)$$

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:

$$F_0 = F_{01} + F_{02} = k_1 \Phi_1 I_{12} \sin \psi + k_2 \Phi_1 I_{12} \sin \psi. \quad (2-21)$$

С учетом, что $I_{12} = \Phi_I$ и $I_{12} = \Phi_{II}$,

$$F_0 = k' \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi; \quad (2-22)$$

$$M_0 = k \Phi_I \Phi_{II} \sin \psi, \quad (2-23)$$

где $k' = k_1 + k_2$; $k = k'd$ — постоянные величины, зависящие от размеров и материала (сопротивления r) диска, расположения полюсов относительно оси диска (шлицы 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_I и Φ_{II}), пронизывающих подвижную систему в разных точках и сдвинутых по фазе на угол $\psi \neq 0$.

2. Величина момента M_0 пропорциональна амплитудам магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} 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 $M_0 = 0$.

3. Знак момента зависит от $\sin \psi$. Иначе говоря, он зависит от сдвига фаз ψ между магнитными потоками Φ_I и Φ_{II} или создающими их токами I_1 и I_2 . При значениях ψ в пределах от 0 до 180° момент M_0 положителен, при этом магнитный поток Φ_{II} опережает поток Φ_I , а сила F_0 направлена от оси опережающего магнитного потока Φ_{II} к оси отставшего Φ_I . При ψ в пределах от 180 до 360° момент M_0 отрицателен. В этом случае поток Φ_{II} отстает от Φ_I , а сила F_0 направлена в обратную сторону — от оси Φ_I к оси Φ_{II} . Таким образом, результирующая сила F_0 всегда направлена от оси опережающего к оси отставшего 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 на-

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

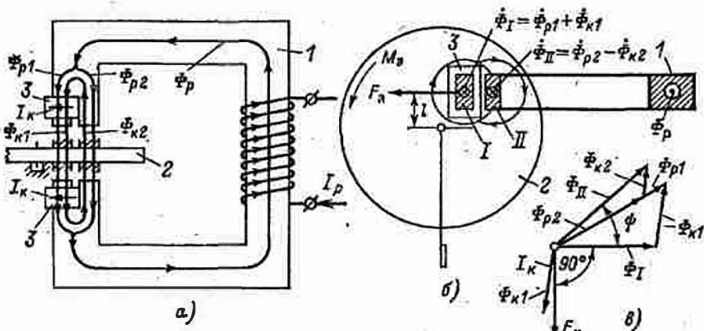


Рис. 2-29. Принцип устройства индукционного реле тока или напряжения с короткозамкнутыми витками.

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

реле I_p и короткозамкнутом витке I_{κ} создают магнитные потоки Φ_p и Φ_{κ} , положительные направления которых показаны на рис. 2-29. Из-под сечения полюса I, охваченного короткозамкнутым витком, выходит результирующий магнитный поток $\Phi_I = \Phi_{p1} + \Phi_{\kappa1}$. Из-под второй части полюса (сечение II) выходит магнитный поток $\Phi_{II} = \Phi_{p2} - \Phi_{\kappa2}$. Оба магнитных потока пронизывают диск, индуктируя 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-

равстве 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_θ и действующий на диск момент

$$M_\theta = F_\theta d = k\Phi_I\Phi_{II} \sin \psi. \quad (2-24)$$

Сила F_θ направлена всегда в сторону короткозамкнутого витка (от опережающего потока Φ_{II} к отставшему 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

$$M_\theta = k' I_p^2. \quad (2-25)$$

При питании обмотки реле током сети I_c ток I_p пропорционален последнему. Поэтому момент реле $M_\theta = k I_c^2$, и, следовательно, реле является токовым. Если же обмотку реле выполнить с большим сопротивлением и питать напряжением сети U_c , то ток в обмотке реле $I_p = U_c / (n_{II} z_p)$, где n_{II} — коэффициент трансформатора напряжения; z_p — сопротивление обмотки реле.

Отсюда

$$M_\theta = k U_c^2. \quad (2-26)$$

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 $M_{np} = M_\theta - M_c$, 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 $d\omega/dt$;

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

Чем больше избыточный момент M_{np} , тем больше угловая скорость 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*.

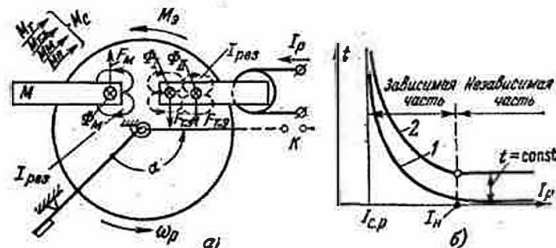


Рис. 2-30. Моменты, действующие на диск индукционного реле при его вращении (а), и характеристика реле $t = f(I_p)$ (б). M_c — момент пружины; $M_т$ — момент трения; M_θ — момент от токов «разрыва», наведенных потоком Φ_{II} постоянного магнита; $M_{т.з}$ — момент от токов «разрыва», наведенных потоками Φ_I и Φ_{II} .

Для получения ограниченно зависимой характеристики параметры реле подбираются так, чтобы при токе I_n (токе насыщения), соответствующем началу независимой части характеристики, магнитопровод реле насыщался. При насыщении магнитопровода увеличение тока $I_p > I_n$ не вызывает увеличения магнитных потоков Φ_I и Φ_{II} , в результате чего избыточный момент и обусловленная 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 Φ_m постоянного магнита, в результате чего в нем наводятся токи «разрыва». От их взаимодействия с магнитным потоком Φ_m возникает момент

$$M_m = k\Phi_m^2 \omega_p, \quad (2-28)$$

противодействующий движению диска. Момент M_m уменьшает избыточный момент, за счет чего уменьшаются скорость ω_p и возрастает выдержка времени t_p .

Аналогично влиянию на вращение диска оказывают моменты $M_{т.01}$ и $M_{т.02}$ от тока «разъезда», наводимых в диске основными магнитными потоками Φ_k и Φ_{II} . Суммарный момент

$$M_{т.0} = M_{т.01} + M_{т.02} \quad (2-29)$$

Моменты M_k и $M_{т.0}$ не влияют на условия срабатывания реле, так как в неподвижном диске токов «разъезда» не возникает, и поэтому моменты M_k и $M_{т.0}$ 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_d и M_n

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

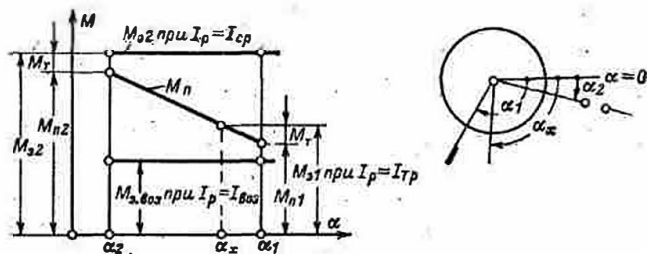


Рис. 2-31. Моменты, действующие на диск индукционного реле при срабатывании и возврате.

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

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

Это различие характеристик M_n и M_d является недостатком индукционных конструкций, вытекающим: 1) ухудшением коэффициента возврата реле;

2) ослабленным нажимом подвижных контактов реле на неподвижные при срабатывании реле; 3) зависимостью 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 продолжают свое движение по инерции за счет накопленной кинетической энергии. Инерционный выбег диска может привести к замыканию по инерции контактов реле после отключения к. э. 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 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 $I_{э.ср}$ реле работает без выдержки времени, отсекая характеристику индукционного элемента. При токах, меньших $I_{э.ср}$, 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 I с короткозамкнутыми витками 2. При появлении тока в обмотке I возникает электромагнитная сила F_d , 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 с 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-

капли контактов реле. Электромагнитной силой F_3 (рис. 2-32, б) противодействует сила F_1 пружины 5. При токе в реле, равном 20—30% тока срабатывания индукционного элемента $I_{н.с.р.}$ под влиянием силы F_3 диск начинает вращаться. При этом в диске наводятся токи «резавил», которые по взаимодействию с магнитным потоком постоянного магнита 6 создают силу F_m , препятствующую вращению диска. При токе в реле $I_p > I_{н.с.р.}$ сумма электромагнитных моментов M_3 и M_m , создаваемых соответственно F_3 и F_m , преодолевает момент пружины, и рамка перемещается, сцепляя червяк 7

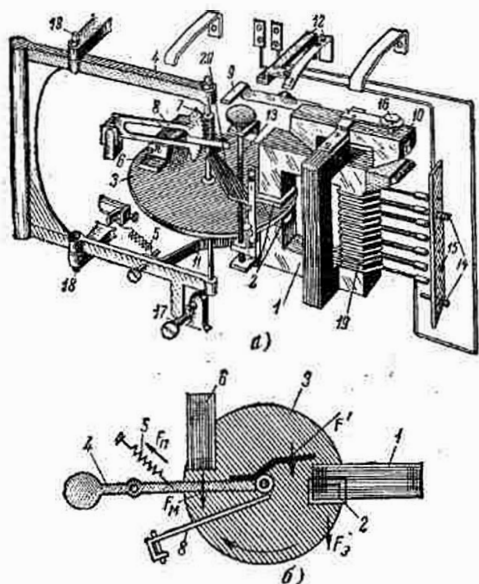


Рис. 2-32. Токовое реле типа РТ-80 и РТ-90.
а — конструкция реле; б — силы, действующие на диск подвижной рамки.

с зубчатым сегментом 8. Увеличение момента пружины 5 компенсируется наращиванием дополнительной силы F' (рис. 2-32, б), притягивающей стальную скобу 11 и 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 гнездах планки 15. Время действия реле регулируется изменением начального положения сегмента 8 винтом 13. Особенности реле являются описанное сцепление торника с сегментом, дающее следующие положительные качества:

- Устраняются недостатки, обуславливаемые различиями характеристик моментов M_3 и M_m .
- Уменьшается инерционный лаг реле, так как после исчезновения тока червяк быстро расцепляется с сегментом и вращение диска по инерции не может привести к замыканию контактов реле.
- Контакты реле замыкаются весьма надежно под влиянием силы, притягивающей якорь 10 электромагнитного элемента.

Электромагнитный элемент (отсека). 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.

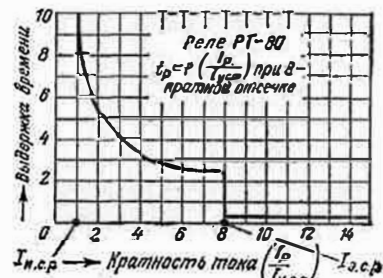


Рис. 2-33. Характеристика реле типа РТ-81.

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)

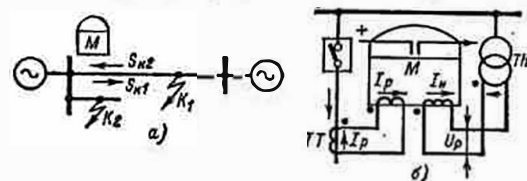


Рис. 2-34. Реле направления мощности.
а — принцип действия; б — схема индукционн.

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. $S_{кз}$ направлена от шин в ли-

прямо и реле направления мощности должно замыкать свои контакты, во втором при к. з. в K_1 — мощность к. з. S_{K1} направлена к шинам, 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 зависят от напряжения U_p , тока I_p и угла сдвига φ_p между ними.

Реле направления мощности применяются в направленных ваттах (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, подводящая 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 $S_{ср}$.

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 подлинной системой в виде цилиндрического ротора (рис. 2-35, а) [11, 12, 9].

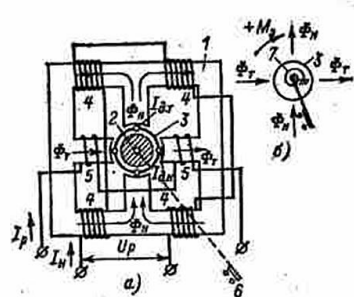


Рис. 2-35. Реле мощности.

а — с цилиндрическим ротором; б — ротор реле с направлением положительного момента M_z .

Реле имеет замкнутый магнитопровод 1 с выступающими внутрь полюсами. Между полюсами установлен стальной цилиндр (сердечник) 2, повышающий магнитную проницаемость между полюсного устройства. Алюминевый 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 положение

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

Обмотка 4 питается напряжением $U_p = U_0/n_n$, а обмотка 5 — током $I_p = I_0/n_t$, где U_0 и I_0 — 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 .

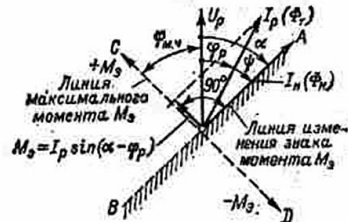


Рис. 2-36. Векторная диаграмма реле мощности.

Угол α определяется индуктивным и активным сопротивлением обмотки 4, питаемой напряжением, и называется углом внутреннего сдвига реле. Угол φ_p зависит от 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 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 подлинную систему реле и вводят в ней вихревые токи $I_{дн}$ и $I_{дт}$ (рис. 2-35, а).

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

$$M_z = k\Phi_n\Phi_t \sin \psi, \quad (2-30)$$

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

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

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

* По аналогии с поляризованным реле, у которого рабочий магнитный поток может менять знак, а полярирующий имеет постоянное 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_θ 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_θ на рис. 2-35, б принято действие M_θ по часовой стрелке — на замыкание контактов.

Наштрихованная часть диаграммы на рис. 2-36 соответствует области положительных моментов, где Φ_r опережает Φ_n , а ψ и его синус имеют положительный знак.

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

Из сказанного следует, что при Φ_r опережающем поток Φ_n , момент M_θ положителен, а при отстающем — отрицателен.

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

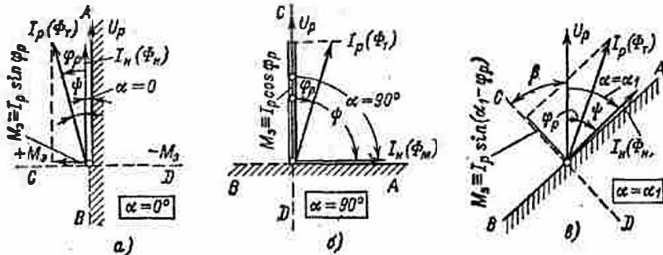


Рис. 2-37. Векторные диаграммы реле мощности разных типов. α — синусового; б — косинусового; в — смешанного.

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_θ от φ_p , как это следует из выражения (2-3):

1. При $\alpha = 0$

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

т. е. момент M_θ 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_θ равен нулю. Зоны положительных и отрицательных вращающих моментов и линия изменения знака момента реле (AB) изображены на рис. 2-37, а.

2. При $\alpha = 90^\circ$

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

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° ,

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

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

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

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_e преодолевает сопротивление пружины M_p и трения M_f . Наименьшая мощность на зажиме реле, при которой оно срабатывает, называется мощностью срабатывания $S_{с.р.}$.

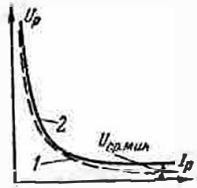


Рис. 2-38. Характеристика чувствительности реле мощности. 1 — теоретическая; 2 — действительная.

У современных индукционных реле направления мощности способность 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 постоянном 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

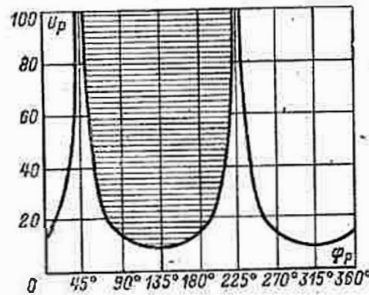


Рис. 2-39. Угловые характеристики реле мощности смешанного типа при $\alpha = 45^\circ$.

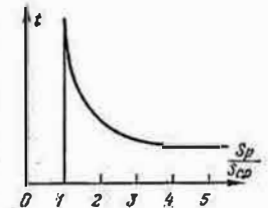
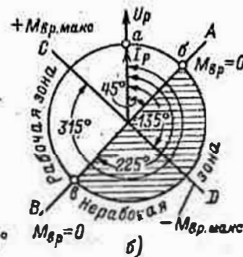


Рис. 2-40. Характеристика времени действия реле мощности $t = f\left(\frac{S_p}{S_{с.р.}}\right)$.

Угловая характеристика представляет собой зависимость $U_{с.р.} = f(\varphi_p)$ при постоянном 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 $U_{с.р., мин.}$ и наиболее выгодную зону углов φ_p , в пределах которой $U_{с.р.}$ близко к $U_{с.р., мин.}$;

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.

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 изготовлять 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, изготовляющие 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) Ляление самохода

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

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

$\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$. 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).

степенной 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 положение сердечника, можно компенсировать неравномерность потоков и воздушный зазор.

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

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

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

1) реле РБМ-171 и РБМ-271, используемые обычно для включения на фазный ток и междупазное 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 замыкающемуся 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:

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

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_a , равен:

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

где d — плечо пар сил F_a ; $k' = k l w_p d$.

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_a можно считать пропорциональным току I_p в обмотке реле, т. е.

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

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

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 1.

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 и 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 размыкание 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.

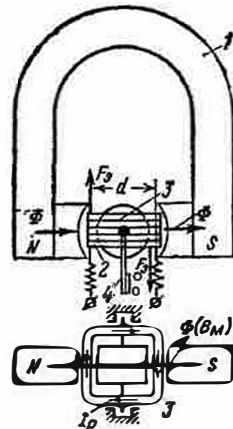


Рис. 2-41. Магнитоэлектрическое реле.

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 подтоковых к реле, а именно:

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

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 выпрямитель, выполняемые с помощью полупроводниковых диодов.

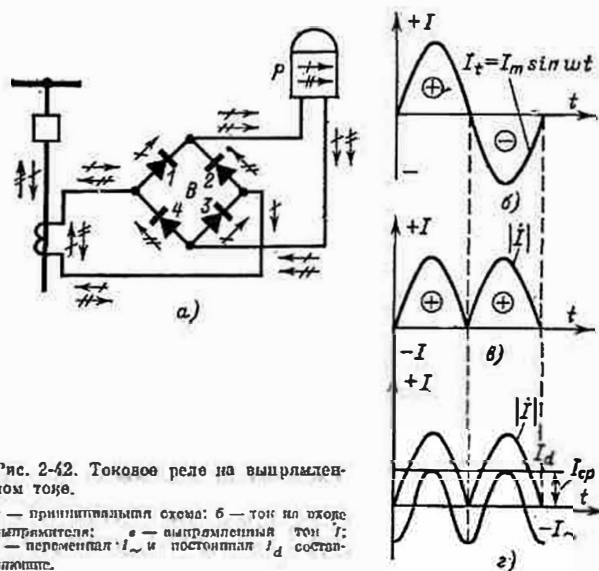


Рис. 2-42. Токое реле на выпрямленном токе.

а — принципиальная схема; б — ток на входе выпрямителя; в — выпрямленный ток I ; г — переменный I_m и постоянный 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 пиком, проходит через реле по двум открытым для положительного тока вентилям 1 и 3, при этом вентили 2 и 4 закрыты. В отрицательный полупериод ток I_t (стрелка с двумя пиками) проходит в реле через вентили 2 и 4, которые в этом случае открываются, а вентили 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, а), 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 составляющая 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 составляющей 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 составляющие 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 составляющая 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 составляющая 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).

Пульсации 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, а последовательно с обмоткой реле P включен дроссель L , индуктивное сопротивление которого $x_L = \omega L = 2\pi f L$ 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.

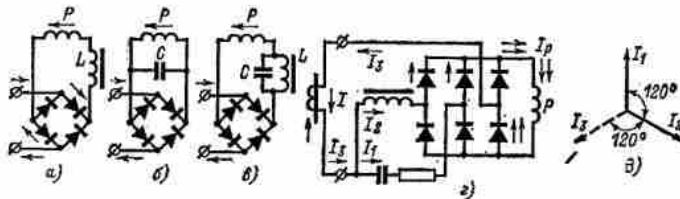


Рис. 2-43. Схемы для сглаживания выпрямленного тока.

а — с последовательным индуктивным сопротивлением; б — с шунтирующим конденсатором; в — с резонансным фильтром, не пропускающим тока с $f = 100$ Гц; г — с расщеплением выпрямляемого тока на три составляющие I_1, I_2, I_3 ; д — векторная диаграмма.

В схеме на рис. 2-43, б обмотка реле P шунтирована конденсатором C с сопротивлением $x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$, 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, в 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 составляющей. Схемы на рис. 2-43, а, б дают наилучший результат для источников переменного тока с малым сопротивлением по отношению к нагрузкам (реле P); схема на рис. 2-43, в более эффективна для источников с большим по отношению к нагрузке сопротивлением.

¹ В рассматриваемых ниже схемах сравнения абсолютных значений двух электрических величин пульсации 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

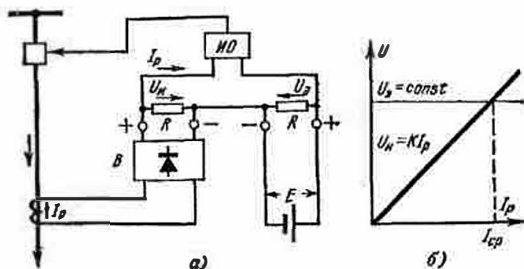


Рис. 2-44. Схема реле на сравнении измеряемой величины (тока I_p) с эталоном I_0 (а) и характеристики срабатывания реле (б).

на 120° с помощью индуктивных и емкостных сопротивлений. Ток $I_3 = -(I_1 + I_2)$ (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_0 , имеющей по другому закону или имеющей постоянное значение (как показано на рис. 2-44, б). Реле работает, если $U_n \geq U_0$.

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 состоит 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 и выходным звеном схемы сравнения включается исполнительный орган 4.

Реле должно действовать при условии, что

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

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 имеют 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).

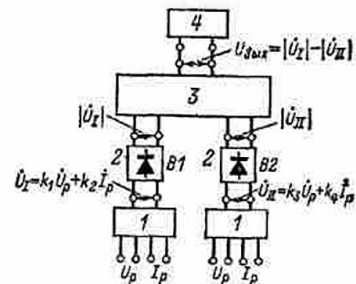


Рис. 2-45. Блок-схема реле на сравнении абсолютных значений двух напряжений $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$.

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 $E_{A2} = k_2 \dot{U}_p$. Трансформатор T_B питается током сети I_p , который создает во вторичных обмотках э. д. с. $\dot{E}_{B1} = k_3 \dot{I}_p$ и $\dot{E}_{B2} = k_4 \dot{I}_p$, 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 $\dot{U}_I = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{B1} = k_1 \dot{U}_p + k_3 \dot{I}_p$, а на второй $\dot{U}_{II} = \dot{E}_{A2} - \dot{E}_{B2} = k_2 \dot{U}_p - k_4 \dot{I}_p$.

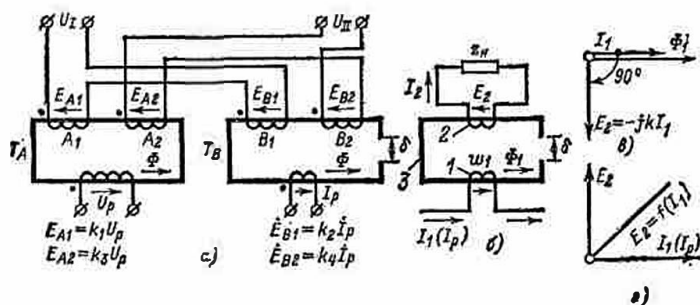


Рис. 2-46. Суммирующее устройство для получения $U_I = k_1 U_p + k_3 I_p$ и $U_{II} = k_2 U_p + k_4 I_p$ (а); трансреактор (б); векторная диаграмма трансреактора (в); зависимость $E_2 = f(I_p)$ (г).

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 $\dot{U}_{II} = -k_4 \dot{I}_p$, при таком суммирующем устройстве реле превратится в переправляющее реле сопротивления (см. § 11-10, б). Исключая из схемы обмотку B_1 , получим направленные 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 трансреактора.

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_H 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 п. с. первичной обмотки, равной в нашем случае $I_p n_1$, и что $\Phi_1 \approx \frac{I_p n_1}{R_m} \equiv I_p$.

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

$$E_2 = 4,44 \omega_1 \Phi_{1m} / = k' \Phi_{1m} = k I_1. \quad (2-42a)$$

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

$$\dot{E}_2 = -jk I_1.$$

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 (2-42a) определяет соотношение между величинами вторичной э. д. с. E_2 и первичным током $I_1 = I_p$. Из (2-42a) $k = E_2 / I_p$. 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 устройств 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 расщелку 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 направления. 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. Сравняемые 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 сравнения U_I и U_{II} производится путем вычитания создаваемых ими токов в обмотке реле. Балластные сопротивления

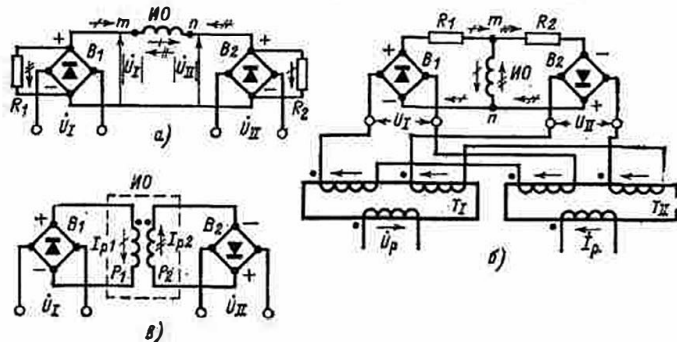


Рис. 2-47. Схема сравнения.

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 $3 \cdot 10^{-6}$ 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 $U_{вых}$ 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. Мощности, 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 нуль-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 собой кристалл (германия или

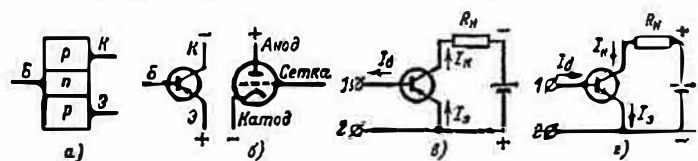


Рис. 2-48. Полупроводниковый триод (транзистор).

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 (плюс на n и минус 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 подаваемое напряжение является прямым для перехода p - n .

В этом случае дырки, являющиеся носителями положительных зарядов, движутся под действием электрического поля, созданного приложенным напряжением от эмиттера в базу, частично рекомбинируются, вызывая ток I_c , 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, но 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 вырывание 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 нагрузке появляется ток $I_k = I_a - I_c$. Если принять $I_b = 1$, то ток I_k приблизительно равен $(1 - 0,05) I_a = 0,95 I_a$. Отношение $\Delta I_k / \Delta I_b = \alpha$ 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_k , создаваемое внешним источником, во много раз превышает напряжение сигнала на входе усилителя (закисы 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_b и $U_c = 0$) триод T_1 получает отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал через сопротивление 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 базу триод T_2 закрыт и ток в реле P отсутствует (или, точнее, он очень мал и равен обратному току коллекторного перехода T_2).

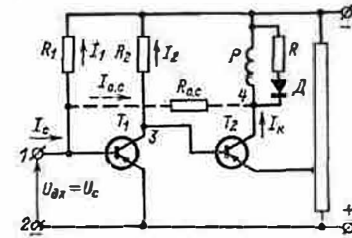


Рис. 2-49. Схема двухкаскадного усилителя постоянного тока, применяемый в качестве нуль-индикатора.

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 $I_k > I_{c.p}$ 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 выводах возникает значительная э. д. с. самоиндукции $e = -L \frac{dI_k}{dt}$, которая может вызвать пробой триода T_2 . Для предотвращения 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 запрещает 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-

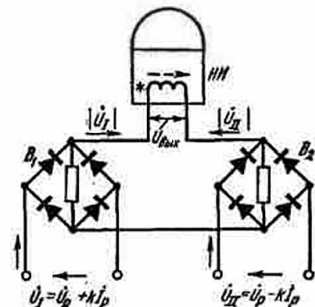


Рис. 2-50. Схема реле направления мощности на сравнении абсолютных величин U_I и U_{II} .

честве пульс-индикатора $НИ$ показано магнитоэлектрическое (или поляризованное) реле. Применяются и другие варианты исполнения обмоток элементов.

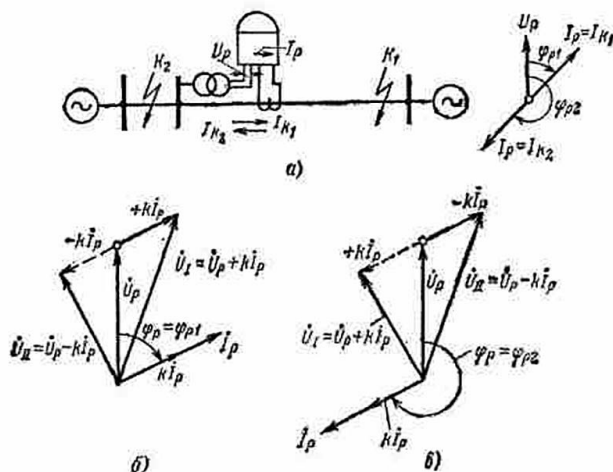


Рис. 2-51. Векторная диаграмма реле.

а — схема сети; б — диаграмма при $k=1$, а) зона; в — диаграмма при $k=2$, зона.

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

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

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

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

После выпрямления на схему сравнения подаются напряжения

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

и

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

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 $\vec{U}_p$ и $\vec{I}_p$, $\vec{U}_I$ и $\vec{U}_{II}$ при к. з. на защищаемой линии в точке K_1 и на соседней линии в точке K_2 , построенные в предположении, что вектор напряжения $k\vec{I}_p$ совпадает по фазе с током $\vec{I}_p$.

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 $|\vec{U}_p + k\vec{I}_p| > |\vec{U}_p - k\vec{I}_p|$, поэтому $U_{вых}$ имеет положительный знак и реле действует. При к. з. на соседней линии (в точке K_2 , рис. 2-51, а и в) мощности направлена к шинам подстанции и имеет отрицательный знак.

В этом случае вектор тока $\vec{I}_p$ и соответственно вектор $k\vec{I}_p$ по сравнению с к. з. в точке K_1 изображаются на диаграмме попернутыми на 180° (рис. 2-51, в). В результате этого $|\vec{U}_p + k\vec{I}_p| \leq |\vec{U}_p - k\vec{I}_p|$, напряжение $U_{вых}$ 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.

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

- 1) при изменении φ_r от 90° до 180° и от 180° до 270° (заштрихованная часть диаграммы на рис. 2-52, а) $|\vec{U}_I| < |\vec{U}_{II}|$, следовательно, $U_{вых} = |\vec{U}_I| - |\vec{U}_{II}|$ имеет отрицательный знак и реле не действует;
- 2) при изменении φ_r от 270° до 360° и от 0° до 90° (незаштрихованная часть диаграммы) $|\vec{U}_I| > |\vec{U}_{II}|$, поэтому $U_{вых}$ положительно и реле работает;
- 3) величина $U_{вых}$ равна нулю при $\varphi_r = 90^\circ$ и 270° , так как при этом $|\vec{U}_I| = |\vec{U}_{II}|$. При $\varphi_r = 0^\circ$ и 180° $U_{вых}$ достигает максимального значения,

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

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

Осуществляя поворот напряжений $\vec{U}_p$ или $k\vec{I}_p$ на угол α с помощью специальных фазосдвигающих схем, можно сместить угловую характеристику реле на угол α и получать аналогичное реле мощности смещавшего для косинусного типа.

Таким образом, реле, построенное на сравнении абсолютных величин $|\vec{U}_p + k\vec{I}_p|$ и $|\vec{U}_p - k\vec{I}_p|$, реагирует (косвенно) на угол сдвига фаз между $\vec{U}_p$ и $\vec{I}_p$, 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 сопротивления. В качестве сравниваемых величин используются два

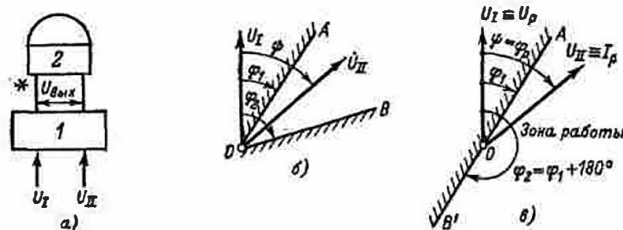


Рис. 2-53. Реле на сравнении фаз $\vec{U}_I$ и $\vec{U}_{II}$ (а); угловая характеристика работы реле (б) и угловая характеристика реле направления мощности (в).

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 $U_{вых}$.

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

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 $k_1 = k_2 = 0$. Тогда $U_I = k_1 U_p$, $U_{II} = k_2 I_p$, 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 $\Delta O B'$ (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.

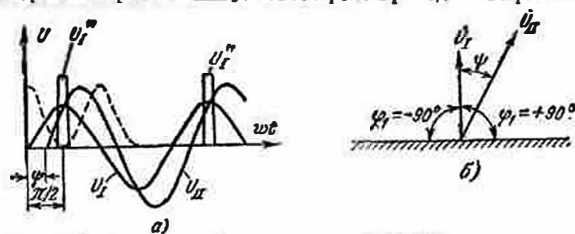


Рис. 2-54. Принцип действия импульсного реле.

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

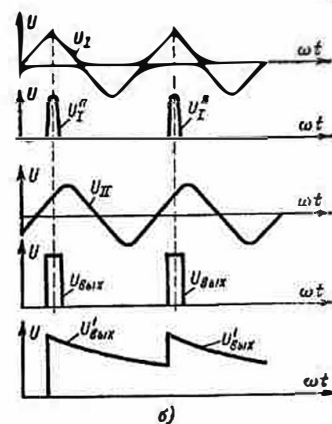
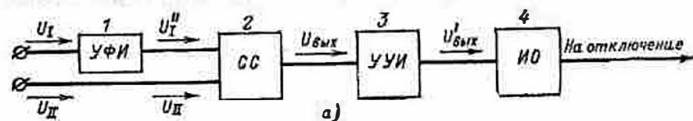


Рис. 2-55. Структурная схема импульсного реле (а); диаграмма работы реле (б).

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_1' в момент прохождения U_1 через положительный максимум.

Импульс U_1' и напряжение U_{II} подаются на схему совпадения 2. Последняя выполняется так, что напряжение на ее выходе $U_{вых}$ появляется, только когда оба входных напряжения U_1' и U_{II} положительны. Выходное напряжение имеет характер кратковременного импульса, продолжительность которого равна длительности U_1' и составляет доли периода. Чтобы обеспечить продолжительность действия выходного реле 4, достаточную для отключения выключателей, предусматривается устройство 3, удлиняющее импульс $U_{вых}$ до необходимой величины. Удлиненный импульс $U_{вых}$ воздействует на исполнительный орган 4, который дает команду на отключение.

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

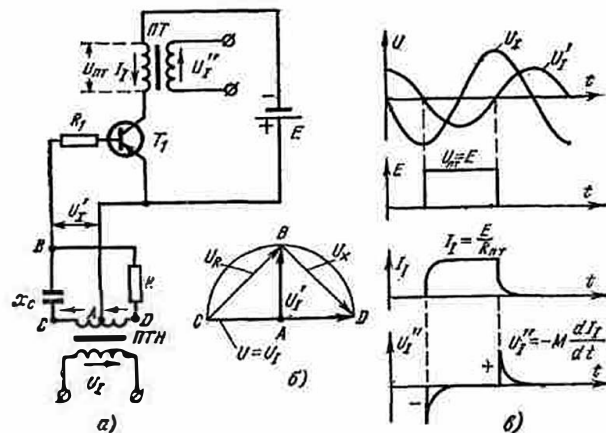


Рис. 2-56. Устройство для получения импульса U_1' (а); схема устройства (б); диаграмма фазоворотной схемы (а).

В качестве примера на рис. 2-56, а приведено устройство для получения импульса U_1' . Напряжение U_1 подается на промежуточный трансформатор ПТН, питающий мостовую фазоворотную схему.

Напряжение U_1' между вершиной моста В и средней точкой А вторичной обмотки ПТН подается на базу триода T_1 . Сопротивление R принимается равным x_C , при этом условии U_1' опережает U_1 на угол 90° (рис. 2-56, б). В цепи коллектора T_1 включен пик-трансформатор ПТ.

Триод T_1 заперт в течение положительной полуволны U_1' и открыт в течение отрицательной. Открываясь, триод T_1 замыкает цепь первичной обмотки ПТ, в которой под действием э.д.с. E возникает постоянный ток I_1 (рис. 2-56, а).

Открытие и закрытие триода происходит в момент перехода U_1' через нуль. В этот момент в первичной обмотке ПТ появляется и исчезает ток I_1 и возникает переходный процесс, сопровождающийся появлением во вторичной цепи ПТ пикообразного напряжения $U_1'' = -M \frac{dI_1}{dt}$ обратной полярности. Кривые токов и напряжений в пик-трансформаторе даны на рис. 2-56, б.

Таким образом, импульс напряжения U_1' получается с помощью пик-трансформатора. Его возникновение в момент прохождения через максимум U_1 обеспечивается тем, что напряжение U_1' , управляющее пик-трансформатором, смещено посредством фазоворотной схемы на 90° по отношению к U_1 .

Реле направления мощности. Если принять $\dot{U}_I = k_1 \dot{U}_P$, а $\dot{U}_{II} = k_2 \dot{U}_P$, 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.

а) 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_0 в пределах которого знаки U_I и U_{II} совпадают, и соответствующее ему время совпадения знаков t_0 зависят от угла сдвига фаз ψ . Как видно из рис. 2-57, б, угол совпадения

$$\varphi_0 = \pi - \psi. \quad (2-46)$$

Угол $\varphi_0 = \omega t_0$, $\psi = \omega t_{nc}$ и $\pi = \omega T/2$, подставив их в (2-46) и разделив все члены уравнения на ω , находим зависимость вре-

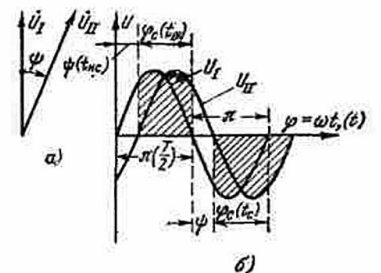


Рис. 2-57. Векторная диаграмма $\dot{U}_I$ и $\dot{U}_{II}$ (а); совпадение знаков мгновенных значений U_I и U_{II} (б).

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 $\varphi_0 = \pi$, а $t_c = T/2$.

С увеличением ψ t_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 разны в течение всего полупериода и поэтому $\varphi_0 = 0$, а $t_c = 0$.

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 некоторым заданным (установленным) временем t_y , которому по (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 по (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

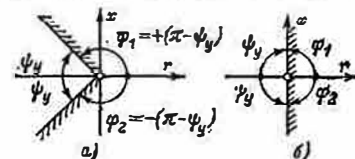


Рис. 2-59. Зоны действия реле.

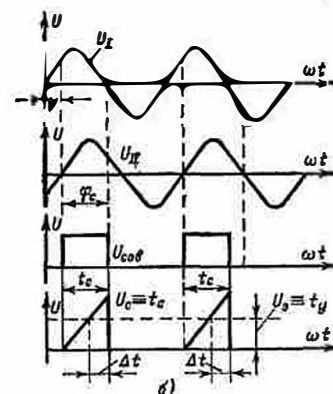
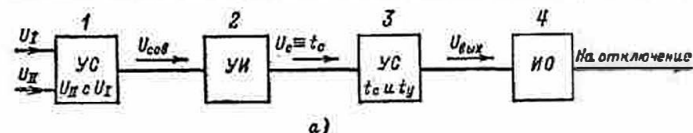


Рис. 2-60. Структурная схема реле на совпадение знаков мгновенных значений U_I и U_{II} (а); диаграмма работы реле (б).

результатирующее напряжение U_{0x} , подаваемое на исполнительный орган 4. Значение и знак U_{0x} зависят от разности $U_c - U_0$. При $U_c > U_0$, чему соответствует условие $t_c > t_y$, исполнительный орган срабатывает. При $U_c < U_0$ (т. е. при $t_c < t_y$) реле не действует.