

В. А. Андреев

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ, ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

ДОПУЩЕНО
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебника для студентов вузов,
обучающихся по специальности
«Электроснабжение»



Москва «Высшая школа» 1991

ББК 31.27—05
А 65
УДК 621.316.925

Рецензенты:
кафедра электроснабжения промышленных предприятий
Алма-Атинского энергетического института (зав. кафедрой А. В. Болотов);
д-р техн. наук, проф. И. В. Жежеленко
(Мариупольский металлургический институт)

Андреев В. А.

А 65 Релейная защита и автоматика систем электроснабжения:
Учеб. для вузов по спец. «Электроснабжение». — 3-е изд., пе-
рераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. — 496 с.: ил.

ISBN 5-06-001762-1

В книге изложены сведения о современных устройствах релейной защиты и автоматике систем электроснабжения. Обоснована необходимость и отмечены тенденции совершенствования этих устройств.

3-е издание (2-е — в 1985 г.) существенно переработано и дополнено материалом о полупроводниковой и микроэлектронной элементной базе, сведениями о защите и автоматике трансформаторов и элементов системы электроснабжения напряжением до 1 кВ, об автоматике синхронных генераторов и защите линий 6—10 кВ, результатах исследований автора в области релейной защиты и автоматики систем электроснабжения.

А 2202080000(4309000000)—413 141—91
001(01)—91

ББК 31.27—05

6П21

ISBN 5-06-001762-1

© В. А. Андреев, 1991

Системы электроснабжения являются сложными производственными объектами кибернетического типа, все элементы которых участвуют в едином производственном процессе, основными специфическими особенностями которого являются быстротечность явлений и неизбежность повреждений аварийного характера. Поэтому надежное и экономичное функционирование систем электроснабжения возможно только при автоматическом управлении ими. Для этой цели используется комплекс автоматических устройств, среди которых первостепенное значение имеют устройства релейной защиты и автоматики. Рост потребления электроэнергии и усложнение систем электроснабжения требуют постоянного совершенствования этих устройств. Наблюдается тенденция создания автоматизированных систем управления на основе использования цифровых универсальных и специализированных вычислительных машин. Вместе с тем широко применяются и простейшие средства защиты и автоматики: плавкие предохранители, автоматические выключатели, магнитные пускатели, реле прямого действия, магнитные трансформаторы тока, устройства переменного оперативного тока и др. Наиболее распространены токовые защиты, простые устройства автоматического повторного включения (АПВ), автоматического включения резервного источника питания (АВР) и автоматической частотной разгрузки (АЧР), используемые в установках с выключателями, оборудованными грузовыми и пружинными приводами. Развитие системы электроснабжения требует постоянного совершенствования этих сравнительно простых устройств защиты и автоматики и разработки новых устройств комплексной автоматизации. При написании учебника «Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения», вышедшего в 1985 г., имелось в виду, что он должен стать общим для всех специализаций специальности «Электроснабжение». Поэтому в нем наряду с изложением общих вопросов релейной защиты, автоматики и телемеханики даны сведения о некоторых характерных особенностях этих устройств с учетом специфики систем электроснабжения промышленных предприятий, городов и сельского хозяйства. Эту часть материала рекомендовалось использовать выборочно в соответствии с профилем специализации. Необходимость нового издания учебника вызвана рядом обстоятельств. Прежде всего — это коренное изменение учебного плана специальности «Электроснабжение». Он дополнен двумя но-

выми специализациями: электроснабжение транспорта и электроснабжение горных предприятий, а из названия дисциплины «Релейная защита, автоматика и телемеханика систем электроснабжения» исключена телемеханика. Это объясняется тем, что объем информации в области телемеханики систем электроснабжения в последнее время резко возрос. Он не укладывается в рамки данной дисциплины и заслуживает отдельного рассмотрения. В связи с этим в самом названии нового издания учебника и в его содержании телемеханика отсутствует. Вместе с тем содержание учебника дополнено некоторыми сведениями об особенностях устройств релейной защиты и автоматики с учетом специфики систем электроснабжения железнодорожного транспорта и горных предприятий. Так, в первом разделе рассмотрены быстродействующие автоматические выключатели, широко применяемые на тяговых подстанциях и постах секционирования, обоснована характеристика реле сопроствления дистанционной защиты тяговой сети. Второй раздел учебника дополнен сведениями о принципе действия и выборе параметров токовой защиты, реагирующей на скорость нарастания или абсолютное приращение тока, рассмотрено поведение и дан расчет параметров токовой направленной отсечки тяговой сети, выполненной быстродействующими поляризованными автоматическими выключателями. В системах электроснабжения горных предприятий опасным повреждением является замыкание на землю. В связи с этим в новом издании учебника расширены сведения о защитах от замыкания на землю, рассмотрены защиты от токов утечки. Переработка учебника и дополнение его новыми материалами вызваны и тем, что за истекшее с 1985 г. время в области релейной защиты и автоматики систем электроснабжения произошли существенные изменения. Основой устройств защиты и автоматики стала полупроводниковая элементная база. В связи с этим коренным образом переработаны все главы первого раздела учебника и значительно расширена глава, посвященная полупроводниковым элементам, а в соответствующих главах рассматриваются схемы и выбор параметров полупроводниковых устройств защиты и автоматики. Для более полного обеспечения общих логических требований в новом издании учебника объединены второй и третий разделы. При этом полностью переработаны и дополнены главы по токовым и дистанционным защитам, устройствам автоматики систем электроснабжения, защите и автоматике электрических сетей напряжением до 1 кВ. Претерпел изменения и четвертый раздел (в данной книге третий). Здесь в соответствующие главы включены новые сведения о системах возбуждения синхронных генераторов, об устройствах автоматического регулирования возбуждения сильного действия, рассмотрены современные синхронизаторы, переработаны и дополнены сведения о дифференциальной защите трансформатора и о защите его плавкими предохранителями, показана возможность использования

жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей для защиты электродвигателей, рассмотрено влияние синхронных электродвигателей на выбор параметров устройств защиты и автоматики элементов системы электроснабжения. Такая структура учебника более полно отражает идею о целесообразности рассматривать релейную защиту и автоматику вместе как единый комплекс применительно к конкретному элементу системы электроснабжения. Попытка реализовать эту идею была предпринята еще в первом издании учебника. Опыт работы с учебником подтвердил высокую эффективность такого изложения материала. Как и предыдущие издания, настоящий учебник является общим для всех специализаций. Краткие сведения об особенностях устройств релейной защиты и автоматики различных систем электроснабжения, изложенные в учебнике, должны дополняться в соответствии со специализацией специальными вопросами релейной защиты и автоматики и изучаться наряду с изучением других дисциплин специализации. В учебнике нашли отражение новейшие достижения в области релейной защиты и автоматики систем электроснабжения, а также результаты исследования автора в этой области. Автор благодарен рецензентам проф. И. В. Жежеленко и коллективу кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Алма-Атинского энергетического института, проф. А. В. Болотову и доц. Н. И. Дворникову за ценные замечания, направленные на улучшение учебника.

Все замечания и предложения по улучшению учебника можно направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

Автор

§ В.1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ, ОБЩНОСТЬ И РАЗЛИЧИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ВЕДУЩИХ ОТРАСЛЕЙ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года электроэнергетика наряду с другими отраслями народного хозяйства и промышленности рассматривается как часть единой народнохозяйственной экономической системы [1].

При этом одной из основных тенденций в развитии энергетики СССР является укрупнение мощностей отдельных агрегатов и электростанций в целом, а также дальнейшее развитие Единой энергетической системы СССР (ЕЭС СССР), которую образуют практически все 11 объединенных энергосистем (ОЭС) страны: Северо-Запада, Центра, Средней Волги, Урала, Юга, Северного Кавказа, Закавказья, Казахстана, Сибири, Средней Азии и Дальнего Востока. Единая энергетическая система СССР охватывает практически всю обжитую территорию страны. Составной частью ЕЭС СССР является электроэнергетическая система, осуществляющая единый процесс производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электроэнергии. Из этого определения следует, что в состав электроэнергетической системы входят системы электроснабжения, состоящие из электроустановок, предназначенных для обеспечения потребителей электрической энергией. Из общего полезного потребления электроэнергии основная доля приходится на промышленность — 59%, или 911 млрд. кВт·ч, из них 29 млрд. кВт·ч на угольную промышленность. Более 15% электроэнергии расходуется на коммунально-бытовые нужды городов, около 14% — на нужды агропромышленного комплекса, более 10% — на электрифицированный транспорт [2]. Общность и различие систем электроснабжения этих важнейших отраслей народного хозяйства обусловлены характером производства, его технологическими процессами. В любой системе электроснабжения непосредственными потребителями электрической энергии являются электроприемник (аппарат, агрегат, механизм, предназначенный для преобразования электрической энергии в другой вид энергии) или группа электроприемников, объединенных технологическим процессом и размещенных на определенной территории. Они разделяются на три категории [3].

Электроприемники первой категории. Они не допускают перерыва электроснабжения, так как это может повлечь за собой опасность для жизни людей,

повреждение оборудования, нарушение технологического процесса и в конечном счете нанести значительный ущерб народному хозяйству. Поэтому электроприемники первой категории обеспечиваются электроэнергией от двух независимых источников питания (ИП). При отключении одного из них перерыв электроснабжения допускается лишь на время автоматического подключения электроприемников к другому независимому источнику. ИП считается независимым, если в послеварийном режиме в нем сохраняется в регламентированных пределах напряжение при исчезновении его на других источниках. К числу независимых ИП относятся, например, две не связанные между собой секции шин

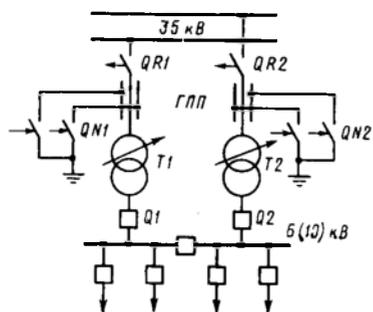


Рис. В.1. Однолинейная схема главной понизительной подстанции

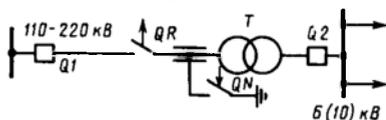


Рис. В.2. Однолинейная схема радиального глубокого ввода

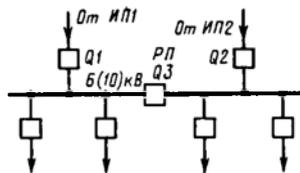


Рис. В.3. Однолинейная схема распределительного пункта

подстанции, каждая из которых связана с независимым ИП. Если между секциями существует связь, то она должна автоматически отключаться при нарушении нормального режима работы одной из секций шин. К первой категории относится и особая группа электроприемников, бесперебойная работа которых необходима для предотвращения взрывов и пожаров. Для них предусматривается дополнительное питание от третьего независимого ИП.

Электроприемники второй категории. Здесь перерыв электроснабжения приводит к массовому недоотпуску продукции, простоям механизмов и промышленного транспорта, нарушению нормальной деятельности значительного числа городских и сельских жителей. Электроприемники второй категории также получают электроэнергию от двух независимых ИП. Однако при нарушении электроснабжения от одного из них допускается перерыв электроснабжения на время, необходимое для включения резервного питания дежурным персоналом или выездной бригадой.

Электроприемники третьей категории. В эту группу входят электроприемники, не относящиеся к первой и второй категориям. Они снабжаются электроэнергией от одного ИП при условии, что перерывы в электроснабжении, вызванные аварией или ремонтом, не превышают одних суток. ИП систем электроснабжения являются районные электроэнергетические системы. В них входят и местные электростанции городов и сельских районов, и теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) промышленных предприятий. Потребители электроэнергии связываются с ИП питающими электрическими сетями через приемные пункты и распределительные сети.

Если ИП достаточно удален, то связь осуществляется питающими линиями напряжением 35—220 кВ, а приемным пунктом является *главная понизительная подстанция* (ГПП) (рис. В.1). Электроснабжение может также осуществляться по схеме *глубокого ввода* в виде блока линия — трансформатор (рис. В.2). Распределительные сети строятся при напряжении 6(10) кВ,

Со стороны высшего напряжения трансформаторов T устанавливаются делители QR с короткозамкательными QN , выключатели Q , предохранители F и открытые плавкие вставки. Тип коммутационного аппарата и схема подключения трансформаторов влияют на характер релейной защиты, автоматики и телемеханики. Когда потребитель располагается вблизи источника питания (местная электростанция), питающая линия выполняется на том же напряжении, что и распределительная сеть, а приемным пунктом электроэнергии является *распределительный пункт* (РП) (рис. В.3). Приемным пунктом в схемах электроснабжения транспорта являются *тяговые подстанции*. В настоящее время в СССР для электрификации железных дорог в качестве основной принята

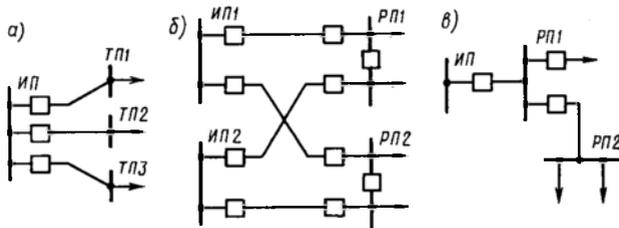


Рис. В.4. Однолинейные радиальные схемы распределительных сетей

система однофазного тока промышленной частоты с напряжением в контактной (распределительной) сети 25 кВ, а электровозы и электропоезда оборудованы тяговыми электродвигателями постоянного тока и выпрямительными установками. При этом тяговая подстанция превращается по существу в ГПП с низким напряжением 25 кВ. Для электрификации транспорта используется также система постоянного тока с номинальным напряжением контактной сети 0,75—3 кВ. В этом случае для преобразования переменного тока в постоянный на тяговых подстанциях используют выпрямительные установки, состоящие из тягового трансформатора и полупроводникового преобразователя [4].

Большинство электроприемников в промышленности, агропромышленном комплексе и в системе электроснабжения городов рассчитано для работы при напряжениях до 1 кВ, поэтому в непосредственной близости от них размещаются *трансформаторные подстанции* (ТП), связываемые линиями напряжением 6(10) кВ с ГПП или РП. Местные электростанции и ГПП являются ИП распределительных сетей.

По структуре построения различаются радиальные, магистральные и смешанные распределительные сети. Они могут быть как с односторонним, так и с двусторонним питанием. При радиальной схеме от шин источников питания ИП отходят линии к каждому распределительному пункту РП или трансформаторной подстанции ТП (рис. В.4). Для электроприемников третьей категории они выполняются одиночными (рис. В.4, а), а для более ответственных — двойными от двух независимых источников питания (рис. В.4, б). Нормальной линией работают раздельно, каждая на соответствующую секцию шин РП. Рассмотренные радиальные схемы одноступенчатые. Если последовательно включено несколько РП, то схема становится многоступенчатой. Радиальные схемы отличаются простотой выполнения и надежностью эксплуатации. Требуемую надежность электроснабжения обеспечивают сравнительно простыми устройствами защиты и автоматики.

Стремление уменьшить число коммутационных узлов и снизить капитальные затраты делает целесообразным использование магистральных схем, при которых РП или ТП один за другим подключаются к одной или двум параллельным линиям (рис. В.5). Одиночные магистральные схемы с односторонним питанием (рис. В.5, а) применяются только для электроснабжения потребите-

лей третьей категории. По надежности электроснабжения и удобству эксплуатации они, как правило, уступают радиальным схемам. Надежность электроснабжения можно повысить, используя одиночные магистральные схемы с двусторонним питанием (рис. В.5, б). При этом в нормальном режиме магистраль целесообразно держать разомкнутой секционными коммутационным аппаратом, устанавливаемым или на одном из РП, или у одного из ИП.

Значительно большую надежность имеют схемы с двумя магистралями. Они применяются для питания двухтрансформаторных подстанций или РП с двумя секциями шин (рис. В.5, а). Трансформаторы и секции шин работают раздельно. При повреждении одной из магистралей отключается половина всех

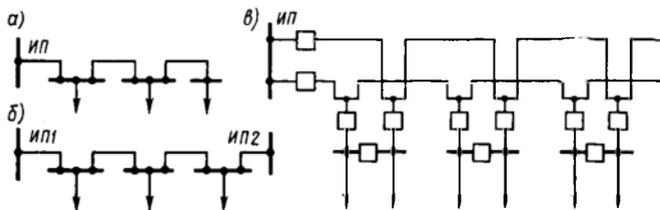


Рис. В.5. Однолинейные магистральные схемы распределительных сетей

потребителей на время, необходимое для переключения их на другую магистраль. Схема с двумя сквозными магистралями приобретает еще большую надежность, если магистрали подключаются к разным источникам питания. Эти схемы можно использовать для питания потребителей первой категории. Рассмотренные радиальные и магистральные схемы применяются также в распределительных сетях напряжением до 1 кВ. Наряду с этим в системах электроснабжения городов встречаются схемы сложноразомкнутой распределительной сети указанного напряжения (замкнутая сетка).

В системах электроснабжения электрические сети в зависимости от режима заземления нейтралей синхронных электрических машин и трансформаторов разделяются на сети с глухозаземленными нейтралью и сети с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралью. К первым из них в Советском Союзе относятся сети напряжением 110 кВ и выше, а также четырехпроводные сети напряжением до 1 кВ. Остальные сети напряжением до 35 кВ включительно имеют или изолированные, или заземленные через дугогасящие реакторы нейтралью.

Системы электроснабжения обычно содержат элементы радиальных и магистральных схем, т. е. выполняются по смешанной схеме, причем сложность схемы определяется категорией электроприемников и суммарной электрической нагрузкой электрифицируемого объекта. Вместе с тем на систему электроснабжения того или иного объекта оказывают влияние его специфические особенности. Укажем основные из них.

Промышленные предприятия. Для них характерны компактность расположения электроприемников, значительная мощность отдельных из них и в связи с этим глубокий ввод напряжением 110—220 кВ, применение мощных трансформаторов, кабельных линий большого сечения и различных токопроводов.

Среди потребителей большая доля приходится на электроприемники первой категории. В связи с этим крупные предприятия имеют одну или даже две собственные электростанции. Характер таких потребителей, как, например, крупные преобразовательные установки и дуговые сталеплавильные электропечи, вызывает появление в напряжении и токе высших гармонических. В связи с этим принимают специальные меры для ограничения этих явлений.

Города. Здесь имеют место многочисленность электроприемников сравнительно небольшой мощности, разбросанных по всей территории города, разнотипность оборудования, отсутствие, как правило, постоянного дежурного персонала на РП и ТП. Городская распределительная сеть выполняется кабельными линиями, часто сдвоенными или строеными, включаемыми одним выключателем.

Предприятия агропромышленного комплекса. Основу системы сельского электроснабжения составляют радиальные сети напряжением 110, 35/10/0,4 кВ. Они характеризуются меньшей, чем городские сети, плотностью нагрузки, изменяющейся в широких пределах в зависимости от времени года. Электроэнергия распределяется преимущественно по воздушным линиям напряжением 10 кВ, а в некоторых районах страны — по воздушным линиям напряжением 15—20 кВ, выполняемым часто стальными проводами.

Раздробленность сельских потребителей электроэнергии и их размещение на значительной территории определяют: большую протяженность сельских распределительных сетей при сравнительно малой передаваемой мощности — в настоящее время она превышает 4 млн. км, а средняя протяженность линий напряжением 6—10 кВ на один РП составляет более 100 км; большое количество ответвлений, длина которых обычно больше длины линии, связывающей источник питания с наиболее удаленным потребителем электроэнергии; низкий уровень токов короткого замыкания (к.з.) — при удаленных коротких замыканиях и повреждениях за трансформаторами токи к.з. оказываются соизмеримыми с токами нагрузки; необходимость секционирования сетей с целью повышения надежности электроснабжения — считается целесообразной установка секционирующих аппаратов на ответвлениях длиной 2—8 км.

В настоящее время в нашей стране придается большое значение электрификации сельского хозяйства как важнейшему средству ускорения технического прогресса в сельскохозяйственном производстве и улучшения культурно-бытовых условий жизни сельского населения. Основными объектами электрификации являются животноводческие предприятия. Они относятся к потребителям первой категории, оснащены сложным электрооборудованием и требуют больших электрических мощностей. Все это приближает их к промышленным предприятиям. Крупными потребителями электроэнергии являются также тепличные хозяйства и сушильные установки.

Перевод сельскохозяйственного производства, и прежде всего животноводства, на промышленную основу требует значительного развития сельских сетей [2]: применения глубоких вводов напряжением 35 и 110 кВ и комплектных подстанций 35, 110/10 кВ, замены воздушных линий кабельными, дальнейшего сокращения радиуса действия линий напряжением 10 кВ и перехода от радиальных схем к магистральным с двусторонним питанием, сооружения для ответственных объектов подстанций с двумя трансформаторами, совершенствования релейной защиты, автоматики и телемеханики.

Горные предприятия. При подземном способе добычи система электроснабжения горного предприятия объединяет электроустановки поверхности шахт и рудничные электроустановки. Условия работы первых мало чем отличаются от условий работы общепромышленных электроустановок. Что касается рудничного электрооборудования, то его отличает взрывозащищенное исполнение. Это оборудование помещается в специальные оболочки, что вызвано специфическими особенностями условий эксплуатации такого оборудования. В частности, пылеобильность и влагообильность горных выработок, пожароопасность и взрывоопасность загазованных шахт, стесненность рабочего пространства, повышенная опасность поражения электрическим током. Для рудничных сетей характерна соизмеримость токов нагрузки с токами короткого замыкания [4].

Железнодорожный транспорт. Общая протяженность электрифицированных железных дорог в стране составляет более 50 тыс. км. Система электроснабжения электрифицированных железных дорог состоит из двух частей [5, 6]: тяговой и внешней. В тяговую часть входят тяговая подстанция и тяговая сеть. Основными элементами последней являются контактная сеть и рельсовый путь. Внешняя часть схемы электроснабжения обеспечивает связь тяговой подстанции с источником питания. Среди потребителей основная доля приходится на электроприемники первой категории. В системах электроснабжения железнодорожного транспорта наиболее ответственный элемент — контактная сеть. Она не может иметь резерва, поэтому надежность работы контактной сети пытаются обеспечить путем ее секционирования. Это позволяет, например, при коротких замыканиях отключать не всю контактную сеть, а только ее поврежденный участок. Токи и напряжения в тяговой сети переменного тока несинусоидальны. В тяговой сети постоянного тока также содержатся гармонические составляющие. И в том, и в другом случае это отрицательно сказывается на работе устройств связи, поэтому принимают специальные меры для ограничения этих влияний. В тяговой сети одним из проводов является не изолированный от земли рельсовый путь, поэтому принимают меры по защите от электрокоррозии смежных с железной дорогой сооружений. При использовании системы однофазного переменного тока

в питающей трехфазной электрической сети имеет место несимметрия токов и напряжений, что отрицательно сказывается на работе внешней части системы электроснабжения. Одна из особенностей состоит и в том, что при движении поезда положение электроприемника изменяется относительно тяговой подстанции. При этом изменяется и напряжение на его выводах. Для обеспечения нормальной работы электроприемника принимаются специальные меры по поддержанию напряжения на необходимом уровне в тяговой сети у поезда. Изложенные краткие сведения о системах электроснабжения дают лишь некоторые общие представления о них, необходимые для определения круга вопросов, подлежащих рассмотрению в учебнике «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения».

§ В.2. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Системы электроснабжения — это сложный производственный комплекс, все элементы которого участвуют в едином производственном процессе, основными специфическими особенностями которого являются быстротечность явлений и неизбежность поврежденный аварийного характера — коротких замыканий в электрических установках. Поэтому надежное и экономичное функционирование систем электроснабжения возможно только при широкой их автоматизации. Для этой цели используется комплекс автоматических устройств, состоящий из устройств автоматического управления и устройств автоматического регулирования.

Устройства автоматического управления. Среди них первостепенное значение имеют *устройства релейной защиты*, действующие при повреждении электрических установок. Релейная защита нашла применение в системах электроснабжения раньше других устройств автоматического управления. Наиболее опасные и частые повреждения — короткие замыкания между фазами электрической установки и короткие замыкания фаз на землю в сетях с глухозаземленными нейтральными. Возможны и более сложные повреждения, сопровождающиеся короткими замыканиями и обрывом фаз. В электрических машинах и трансформаторах наряду с указанными повреждениями возникают замыкания между витками одной фазы. Вследствие короткого замыкания нарушается нормальная работа системы электроснабжения с возможным выходом синхронных генераторов, компенсаторов и электродвигателей из синхронизма и нарушением режима работы потребителей. Опасность представляет также термическое и динамическое действие тока к.з. как непосредственно в месте повреждения, так и при прохождении его по неповрежденному оборудованию.

Для предотвращения развития аварии и уменьшения размеров повреждения при к.з. необходимо быстро выявить и отключить

поврежденный элемент системы электроснабжения. В ряде случаев повреждение должно быть ликвидировано в течение долей секунды. Очевидно, что человек не в состоянии справиться с такой задачей. Определяют поврежденный элемент и воздействуют на отключение соответствующих выключателей устройства релейной защиты с действием на отключение. Основным элементом релейной защиты является специальный аппарат — реле. В некоторых случаях выключатель и защита совмещаются в одном устройстве защиты и коммутации, например в виде плавкого предохранителя.

Однофазные замыкания на землю в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящие реакторы нейтралью не сопровождаются возникновением больших токов (токи не превышают нескольких десятков ампер). Междофазные напряжения при этом не изменяются и работа системы электроснабжения не нарушается. Тем не менее этот режим работы нельзя считать нормальным, так как напряжения неповрежденных фаз относительно земли возрастают и возникает опасность перехода однофазного замыкания на землю в многофазные короткие замыкания. Однако необходимости в быстром отключении поврежденного участка нет, поэтому устройства релейной защиты от замыканий на землю обычно действуют на сигнал, привлекая внимание персонала. Исключения составляют системы электроснабжения горных предприятий, где по требованию техники безопасности защиты выполняются с действием на отключение.

Иногда в эксплуатации возникают ненормальные режимы, вызванные перегрузкой оборудования или внешними короткими замыканиями, возникающими в других элементах. При этом по неповрежденному оборудованию проходят значительные токи (*сверхтоки*), которые приводят к преждевременному старению изоляции, износу оборудования. Сверхтоки, вызванные внешними короткими замыканиями, устраняются после отключения поврежденного элемента собственной защитой. От сверхтоков перегрузки на соответствующем оборудовании должна предусматриваться защита, действующая на сигнал. При этом оперативный персонал принимает меры к разгрузке оборудования или к его отключению. При отсутствии постоянного дежурного персонала защита должна действовать на автоматическую разгрузку или отключение. Своеобразным ненормальным режимом является режим качаний параллельно работающих синхронных электрических машин, возникающий вследствие коротких замыканий, приводящих к торможению одних и ускорению других синхронных машин. Качания сопровождаются повышением тока и понижением напряжения, изменения действующих значений которых имеют пульсирующий характер. При этом устройства релейной защиты не должны действовать на отключение. Для восстановления нормального режима иногда предусматривается специальная *противоаварийная автоматика* (ПА),

которая при возникновении качаний и возможном нарушении устойчивости работы осуществляет деление системы в определенных узлах на несинхронно работающие части. Из этого следует, что одной релейной защиты недостаточно для обеспечения надежности и бесперебойности электроснабжения. В этом также можно убедиться на примере рассмотренных схем электроснабжения. Шины распределительного пункта РП обычно выполняются в виде двух секций (см. рис. В.3). Секционный выключатель $Q3$ при нормальной работе отключен. Каждая отходящая от шин линия электроснабжения потребителей связана только с определенной секцией. При повреждении одной из питающих РП линий и отключении ее релейной защитой электроснабжение потребителей соответствующей секции прекращается. Электроснабжение можно восстановить включением секционного выключателя $Q3$ *устройством автоматического включения резерва (УАВР)*.

Опыт эксплуатации воздушных линий электропередачи показывает, что большинство повреждений после быстрого отключения линий релейной защитой самоустраняется, а линия, включенная повторно, остается в работе, продолжая обеспечивать электроснабжение. Повторное включение выполняется *устройством автоматического повторного включения (УАПВ)*.

Повреждение одного из элементов системы электроснабжения и его отключение, как правило, отражаются на работе всей системы. Например, отключение части потребителей приводит к избытку вырабатываемой электроэнергии и, как следствие, часто к недопустимым повышениям частоты и действующего значения напряжения. Кроме того, при отключении мощного генератора появляется дефицит электроэнергии, что может привести к глубокому снижению частоты и действующего значения напряжения, расстройству работы потребителей, выходу из синхронизма генераторов и нарушению устойчивости работы всей энергосистемы.

Нежелательные процессы протекают так быстро, что оперативный персонал не в состоянии предотвратить их развитие и с требуемой быстротой восстановить нормальный режим. Если все генераторы системы загружены активной мощностью полностью, то восстановить частоту можно только путем отключения части наименее ответственных потребителей с помощью *устройства автоматической частотной разгрузки (УАЧР)*.

Устройства автоматического регулирования. При наличии резерва активной мощности частота в системе поддерживается на требуемом уровне автоматически с помощью *автоматических регуляторов частоты вращения синхронных генераторов* путем воздействия на регулирующие клапаны турбин.

Все электроприемники рассчитывают на определенное напряжение, при котором они имеют наилучшие технико-экономические показатели работы. Снижение напряжения нарушает условия их нормальной работы и приносит ущерб народному хозяйству.

Напряжение в системе электроснабжения можно восстановить путем изменения ЭДС синхронных генераторов и с помощью других источников реактивной мощности.

Для поддержания напряжения применяются *устройства автоматического регулирования возбуждения синхронных генераторов* (УАРВ).

Напряжением в системе электроснабжения можно также управлять путем автоматического изменения реактивной мощности, вырабатываемой компенсирующими устройствами: непрерывно-синхронными компенсаторами и перевозбужденными синхронными электродвигателями (изменением их возбуждения УАРВ) и дискретно (ступенчато) — компенсирующими конденсаторными установками (изменением числа включенных секций конденсаторов автоматическими устройствами управления компенсирующими установками). Широко применяются также *устройства автоматического регулирования коэффициентов трансформации трансформаторов* с УРПН (устройствами регулирования под нагрузкой). В системах электроснабжения синхронные генераторы обычно работают параллельно. Включение их на параллельную работу допускается только при выполнении определенных условий, при этом процесс включения называется синхронизацией. Его можно полностью автоматизировать. Для этой цели используют *автоматические синхронизаторы*, которые не только выбирают момент включения генератора, но и регулируют его напряжение и частоту вращения в процессе синхронизации.

Автоматизированная система управления. Для автоматического управления системой электроснабжения в целом и обеспечения экономичности нормальных режимов ее работы в настоящая время имеется автоматизированная система управления (АСУ), построенная на основе использования цифровых универсальных и специализированных (управляющих) электронных вычислительных машин (ЭВМ). Для функционирования АСУ необходим непрерывный поток информации о режимах производственного процесса, особенно о значении напряжения, тока, мощности, частоты и состоянии оборудования. Системы электроснабжения крупных промышленных предприятий, городов и особенно предприятий агропромышленного комплекса и железнодорожного транспорта сосредоточены на значительных территориях. Поэтому необходимы автоматические информационные устройства, обеспечивающие сбор и передачу информации от контролируемых пунктов (КП) на диспетчерские пункты (ДП), где находятся ЭВМ и диспетчерский персонал. Для передачи управляющих воздействий от ДП на электрические установки КП необходимы соответствующие автоматические управляющие устройства. Для этих целей применяются системы телемеханики: телесигнализация (ТС) и телеизмерения (ТИ) — для сбора и передачи информации; телеуправления (ТУ) и телерегулирования (ТР) — для управления на расстоянии ре-

жимами работы электрических установок. В ряде случаев выделяется система автотелеуправления (АТУ).

Устройства телемеханики передают информацию и управляющие воздействия по линии связи КП и ДП. Применяются или отдельные линии (проводные, радиорелейные), или провода линий системы электроснабжения. При этом информация от КП или управляющие воздействия от ДП предварительно преобразуются в сигналы, удобные для передачи на значительные расстояния. Поэтому в состав любой системы телемеханики входят передатчик, канал связи и приемник. С помощью передатчика и приемника осуществляют преобразование сигналов. Канал связи служит для независимой передачи сигналов. В некоторых системах телемеханики многие элементы передатчика и приемника являются неотъемлемой принадлежностью канала связи. Средства телемеханики позволяют одну линию связи использовать для нескольких каналов связи, что сокращает капитальные затраты.

Объем телемеханизации в системах электроснабжения различен. Он, в частности, определяется местными условиями, степенью автоматизации производственного процесса, а также технико-экономическим эффектом от введения тех или иных систем телемеханики.

В настоящее время созданы и находятся в эксплуатации устройства телемеханики 4-го поколения на основе микропроцессорной техники. Такими устройствами являются, в частности, управляющие вычислительные комплексы типа УВТК. Использование микропроцессорной техники позволяет значительно расширить функции и возможности телемеханических систем. Дальнейшее совершенствование средств телемеханики идет по пути создания так называемых интеллектуальных контролируемых пунктов, которые способны выполнять первоначальную обработку информации и тем самым повысить быстродействие системы.

§ 5.3. ЭЛЕМЕНТЫ И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ЧАСТИ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Устройства релейной защиты и автоматики состоят из отдельных функциональных элементов, связанных между собой общей схемой. Назначение каждого элемента — преобразовать входные сигналы, полученные от предыдущего элемента, и передать их следующему элементу. В каждом устройстве элементы объединяются в функциональные части. Условно в соответствии с последовательностью преобразования и передачи сигналов выделяют измерительную, передающую, логическую и исполнительную части [7]. Некоторые из них могут и не быть в конкретном устройстве.

Измерительная часть. Элементы измерительной части контролируют тот или иной параметр системы электроснабжения, например амплитуду (абсолютное значение) тока, напряжения, угол

сдвига фаз между ними, значение частоты. Указанные параметры вторичных напряжения и тока, получаемых от первичных измерительных преобразователей (трансформаторов) напряжения и тока электрических установок, являются *информационными параметрами*. Вторичные напряжения и ток измерительных трансформаторов являются *основными входными электрическими сигналами* автоматических устройств, их воздействующими величинами. Воздействующей величиной, согласно ГОСТ 16022—83, называется электрическая величина, которая одна или в сочетании с другими электрическими величинами должна быть приложена к электрическому реле в заданных условиях для достижения ожидаемого функционирования. В ряде случаев используются и неэлектрические величины, которые соответствующими измерительными элементами (датчиками) преобразуются в электрический входной сигнал устройства.

Различаются *аналоговые* (в частности, непрерывные) и *дискретные* (в частности, цифровые) *сигналы*. Определяющий признак аналоговых сигналов — бесконечное множество возможных значений информационного параметра. Аналоговый непрерывный сигнал характеризуется непрерывным изменением информационного параметра во времени. Признак дискретного сигнала — ограниченное число допускаемых значений информационного параметра, часто только два значения. Дискретный цифровой сигнал представляет собой число импульсов в единичной (число-импульсный сигнал) или в двончной системе счисления.

Основные входные электрические сигналы являются аналоговыми. Они поступают на входы измерительной части устройств релейной защиты и автоматики. Измерительная часть может содержать несколько *измерительных органов* непрерывного или релейного действия. Измерительный орган непрерывного действия имеет непрерывную *проходную характеристику* (зависимость выходного сигнала Y от входного X), а релейного действия — релейную проходную характеристику. Релейный измерительный орган преобразует аналоговый сигнал в дискретный с двумя значениями информационного параметра. Простейшие измерительные органы релейного действия — измерительные реле тока, напряжения, мощности, сопротивления.

Электрическим реле, согласно ГОСТ 16022—83, называется аппарат, предназначенный производить скачкообразные изменения в выходных цепях при заданных значениях электрических воздействующих величин. При этом считают, что реле срабатывает, т. е. выполняет заданные функции. Различают *максимальные* и *минимальные* измерительные реле. Максимальные реле срабатывают при значениях воздействующей величины, больших заданного значения, минимальные — при значениях воздействующей величины, меньших заданного значения. В зависимости от способа включения в защищаемую цепь реле делятся на *первичные* и *вторичные*.

Первичные реле включаются непосредственно в главную электрическую цепь, а вторичные — через первичные измерительные преобразователи. В зависимости от способа воздействия на коммутационный аппарат (например, выключатель) защищаемого объекта различают реле прямого и реле косвенного действия. В *реле прямого действия* подвижная система механически связана с отключающим устройством коммутационного аппарата. *Реле косвенного действия* управляет цепью электромагнита отключения выключателя через исполнительный элемент.

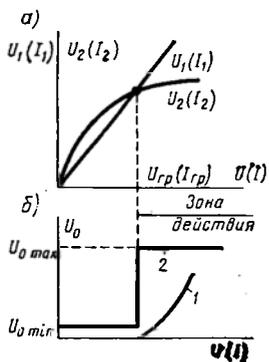


Рис. В.6. Графики, иллюстрирующие действие измерительного органа с одной электрической величиной

Устройства релейной защиты и автоматики выполняются так, что сигнал на выходе измерительного органа появляется лишь в том случае, если входные сигналы удовлетворяют некоторым условиям, например при достижении амплитудой тока определенного значения. Из этого следует, что измерительный орган сравнивает сигналы. Различают два основных принципа сравнения электрических величин: *по амплитуде* (абсолютному значению) и *по фазе*.

В зависимости от числа воздействующих величин различают измерительные органы с одной, двумя электрическими величинами и более. Применяются в основном измерительные органы с одной и двумя электрическими величинами.

Чтобы произвести сравнение, необходимо иметь не менее двух величин. В измерительном органе с одной воздействующей величиной в качестве второй может использоваться некоторая стабильная постоянная величина. Так, например, в электромеханическом реле — это механический момент пружины, в полупроводниковом реле — стабилизированное напряжение. При этом операции сравнения предшествует операция преобразования воздействующей величины в величину, однородную постоянной.

Сравнение можно произвести и другим способом. Для этого воздействующая величина $U(I)$ преобразуется в две сравниваемые $U_1(I_1)$ и $U_2(I_2)$ так, чтобы они были разными ее функциями и их графики пересекались при некотором значении $I_{гр}$ ($I_{гр}$), которое является граничным условием появления сигнала на выходе измерительного органа или границей зоны действия (рис. В.6, а). Если для появления сигнала на выходе измерительного органа необходимо, чтобы $U_1(I_1) \geq U_2(I_2)$, то его зона действия располагается справа от граничной точки. Она является лучом, совпадающим с осью $U(I)$. На выходе измерительного органа непрерывного действия сигнал аналоговый в виде, например, изменяющейся пропорционально разности $U_1(I_1) - U_2(I_2)$ постоянной составляющей U_0 напряжения (кривая 1 на рис. В.6, б). На выходе измерительного органа релейного действия сигнал дискретный в виде скачкообразно изменяющегося напряжения от $U_0 \min$ до $U_0 \max$ (кривая 2), в частном случае напряжение $U_0 \min = 0$. Появление дискретного сигнала означает срабатывание измерительного органа релейного действия.

В измерительном органе с двумя электрическими величинами сравниваются или сами воздействующие величины (U и I), или величины, линейно завися-

шие от них, например $\underline{A} = k_1 \underline{U} + k_2 \underline{I}$ и $\underline{B} = k_3 \underline{U} + k_4 \underline{I}$. В общем случае коэффициенты $k_1 - k_4$ являются комплексными. Они не зависят от \underline{U} и \underline{I} . Для анализа поведения измерительного органа используют плоскости комплексных переменных $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ или $\underline{W} = \underline{A}/\underline{B}$, связанных между собой следующими зависимостями [8]:

$$\underline{W} = (k_1 \underline{Z} + k_2) / (k_3 \underline{Z} + k_4) \text{ и } \underline{Z} = (k_4 \underline{W} - k_2) / (k_1 - k_3 \underline{W}).$$

В плоскостях имеются соответствующие друг другу зоны действия и зоны недействия, разделенные граничными линиями.

Для измерительного органа, сравнивающего величины \underline{A} и \underline{B} по их абсолютному значению, граничная линия определяется равенством $\underline{W} = 1$ при любом угле φ сдвига фаз между ними и является окружностью с центром в на-

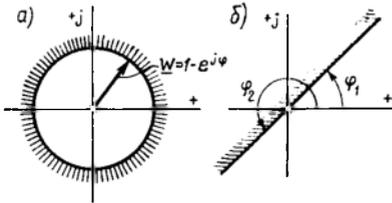


Рис. В.7. Зона действия измерительных органов с двумя электрическими величинами в плоскости \underline{W} :

а — при сравнении абсолютных значений;
б — при сравнении по фазе

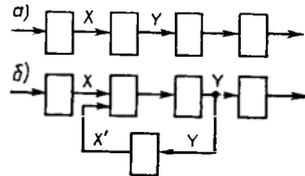


Рис. В.8. Структурные схемы соединения элементов без обратной связи (а) и с обратной связью (б)

чале координат и радиусом, равным единице. Зоной действия при $\underline{W} \geq 1$ является плоскость вне окружности (рис. В.7, а). Сравнить по абсолютному значению можно величины как переменного, так и постоянного тока. Сравнить по фазе можно лишь величины переменного тока. При этом условием появления сигнала на выходе измерительного органа является

$$\varphi_1 < \widehat{(\underline{A}, \underline{B})} < \varphi_2 \text{ или } \varphi_1 < \arg \underline{W} < \varphi_2,$$

так как угол между векторами \underline{A} и \underline{B} представляет собой аргумент их отношения. При $\varphi_2 = \varphi_1 + \pi$, что обычно имеет место, граничная линия является прямой, проходящей через начало координат (рис. В.7, б).

Логическая часть. В большинстве случаев выходной сигнал функционального элемента зависит только от его входного сигнала, а обратная зависимость отсутствует. При этом если, например, элементы соединены друг с другом последовательно, то сигнал \underline{Y} в каком-либо месте устройства зависит от всех предыдущих элементов, но не зависит от последующих (рис. В.8, а). Направление действия элементов указывается стрелкой. В ряде устройств необходимо, чтобы последующие элементы оказывали влияние на предыдущие. Это достигается с помощью обратной связи (рис. В.8, б), на вход которой подается сигнал от последующих элементов, а выход с сигналом $\underline{X}' = k_{o.c} \underline{Y}$ присоединяется к предыдущим, где $k_{o.c}$ — коэффициент обратной связи. В зависимости от его знака образуется положительная или отрицательная обратная связь.

При положительной обратной связи сигнал на входе второго элемента усиливается ($X+X'$), а при отрицательной — ослабляется ($X-X'$).

Выходной дискретный сигнал устройства в целом формирует его логической частью, которая преобразует дискретные входные сигналы в дискретные выходные, являющиеся входными сигналами исполнительской части устройства. Логическая часть содержит обычно несколько логических элементов, поэтому появление дискретного сигнала на выходе в общем случае зависит от комбинации входных сигналов. Таких основных комбинаций три — это логические операции ИЛИ, И, НЕ. Условное изображение этих операций дано на рис. В.9.

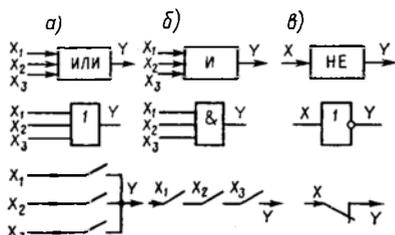


Рис. В.9. Условное изображение логических операций ИЛИ, И, НЕ

Операция ИЛИ (рис. В.9, а) представляет собой логическое сложение (дизъюнкция) $Y=X_1+X_2+X_3+\dots$ и показывает, что сигнал на выходе появляется, если есть сигнал X хотя бы на одном из входов. Это достигается параллельным соединением элементов. Операция И (рис. В.9, б) представляет собой логическое умножение (конъюнкция) $Y=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$. Сигнал Y на выходе есть, если есть сигналы на

всех входах. Это соответствует последовательному соединению элементов. Операция НЕ (рис. В.9, в) выражает логическое отрицание (инверсия) $Y=\bar{X}$ и показывает, что сигнал Y на выходе появляется только тогда, когда нет сигнала X на входе. Если логическая часть схемы выполняется электромеханическими реле, то рассмотренные логические операции можно осуществить путем соединения их контактов, как показано на рис. В.9. В общем случае логическая часть устройства может быть весьма сложной. Ее оптимальное построение невозможно без использования математической логики [9].

Исполнительная часть. Выходные воздействия релейной защиты, устройств автоматики релейного действия и телеуправления обычно являются дискретными воздействиями на отключение и включение выключателей синхронных генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и других электрических установок. Они формируются соответствующими исполнительными элементами в виде относительно мощных электромеханических реле и контактов, включающих электромагниты отключения и включения приводов выключателей. Исполнительные элементы устройств автоматики непрерывного действия (автоматических регуляторов) представляют собой мощные тиристорные или магнитные усилители, выходные токи которых изменяют, например, ток возбуждения синхронного генератора. Исполнительные элементы релейной

защиты, автоматики, особенно телеизмерения и телесигнализации, служат также для ввода информации в ЭВМ и отображения информации, необходимой дежурному персоналу. К ним относятся, например, устройства световой и звуковой сигнализации, измерительные приборы и др.

Передающая часть. В системах телемеханики, а иногда релейной защиты и автоматики возникает необходимость передавать сигналы на значительные расстояния. Для этого служит передающая часть устройства, одним из основных элементов которой является канал связи.

§ В.4. ФУНКЦИИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ЭТИМ УСТРОЙСТВАМ

Устройства защиты и автоматики должны выполнять определенные функции. Для автоматических регуляторов возбуждения, например, функциями являются быстрое и значительное увеличение возбуждения синхронных машин в аварийном режиме, а также наиболее выгодное распределение реактивной мощности между параллельно работающими генераторами и поддержание требуемого уровня напряжения на шинах электростанции или в иной точке системы электроснабжения в нормальном режиме. Для релейной защиты такими функциями являются срабатывание при повреждении защищаемого элемента системы электроснабжения (внутренние повреждения) и несрабатывание при коротких замыканиях за пределами этого элемента (внешние к.з.), а также в нормальных режимах. Иногда допускается срабатывание защиты и при внешних к.з. На каждом элементе системы электроснабжения обычно устанавливаются основную и резервную защиты. *Основная защита* предназначена для действия при к.з. в пределах всего защищаемого элемента с временем, меньшим, чем у других защит, а *резервная защита* работает вместо основной в случае ее отказа или вывода из работы. Такое резервирование называется *ближним*. К резервной защите обычно предъявляется требование срабатывать и при повреждениях на смежных элементах в случае отказа их собственных защит или выключателей. При этом резервная защита выполняет *дальнее резервирование*. В условиях эксплуатации в силу ряда причин защита может не справиться с заданными функциями: не сработать при повреждении в пределах защищаемого элемента (отказ срабатывания); сработать при внешних к.з. (излишнее срабатывание) и при отсутствии повреждений в системе электроснабжения (ложное срабатывание). Все эти неправильные действия называются *отказом функционирования* защиты. С целью ограничения отказов функционирования защите придаются определенные свойства. Основные из них — селектив-

ность, устойчивость функционирования, надежность функционирования [10]. Рассмотрим каждое из этих понятий.

Под **селективностью** понимают высшее свойство релейной защиты, действующей на отключение, определять поврежденный элемент и отключать только его. Для релейной защиты, действующей на сигнал, селективность — это способность однозначно указывать место возникновения ненормального режима и конкретно элемент системы электроснабжения, требующий вмешательства персонала.

На каждом элементе системы электроснабжения (генератор, трансформатор, линия и др.) устанавливается один или несколько комплектов релейной защиты, которые должны отключать защищаемый элемент при повреждениях в нем или подавать сигнал о ненормальном режиме защищаемого элемента. Если по принципу своего действия защита срабатывает только при к.з. на защищаемом элементе, то ее относят к защитами, обладающим *абсолютной селективностью*. Защиты, которые могут срабатывать как резервные при повреждении на смежном элементе, если это повреждение не отключается, называются *относительно селективными*. Например, при повреждении в точке *K* (рис. В.10) должна действовать защита *A3* и не должны действовать защиты *A1* и *A2*.

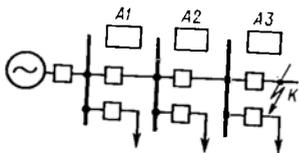


Рис. В.10. Схема радиальной сети с устройствами релейной защиты

Однако, если по каким-либо причинам (неисправность защиты, неисправность выключателя) повреждение не будет отключено, подействует на отключение относительно селективная защита *A2*.

В ряде случаев для упрощения защиты или ускорения ликвидации повреждений допускается неселективное действие защиты, например *A2* (рис. В.10) при одновременном действии на отключение защиты *A3*. Последующее действие автоматики (например, УАПВ второй линии) обеспечивает результирующее селективное отключение поврежденного элемента (к.з. в точке *K*).

Селективность является также свойством некоторых устройств автоматики, например автоматической частотной разгрузки, автоматики деления энергосистемы при качаниях. Желательно, чтобы при повреждении защищаемого элемента защита срабатывала селективно и с минимальным временем при коротких замыканиях в любой его точке. Иными словами, селективность срабатывания устройства защиты при внутренних коротких замыканиях характеризуется его *защитоспособностью* (свойство защищать весь элемент) и *быстротой срабатывания*.

Быстродействие защиты при коротких замыканиях обеспечивает уменьшение вероятности нарушения синхронной работы генераторов, компенсаторов и электродвигателей; снижение продолжительности работы электроприемников при пониженном напряжении; снижение торможения асинхронных электродвигателей и на-

рушений технологических процессов; уменьшение разрушений изоляции и токоведущих частей токами к.з.; снижение вероятности несчастных случаев; повышение эффективности УАПВ и УАВР.

Время отключения поврежденного элемента складывается из времени действия защиты и времени действия выключателя. Следовательно, для ускорения отключения повреждений необходима не только быстродействующая защита, но и быстродействующие выключатели. Защиты, время срабатывания которых не превышает $t_{с.з.} = 0,1 \dots 0,2$ с, считаются быстродействующими. Время отключения наиболее распространенных выключателей не превышает $t_{о.в.} = 0,06 \dots 0,15$ с.

При коротком замыкании уменьшается напряжение. При этом синхронная работа генераторов, компенсаторов и синхронных электродвигателей может сохраняться не только благодаря быстродействию защиты, но и благодаря быстрому повышению их возбуждения. Это определяет необходимость быстродействия автоматических регуляторов возбуждения синхронных машин. В результате повышается и надежность действия релейной защиты из-за увеличения токов к.з.

Для повышения надежности электроснабжения необходимо не только быстро отключить поврежденный элемент, но и быстро включить его повторно в работу или заменить его резервным. Таким образом, быстродействием должны обладать также УАПВ и УАВР.

Устойчивость функционирования. При коротких замыканиях на защищаемом элементе устойчивость функционирования характеризуется чувствительностью и устойчивостью быстроты срабатывания.

Под *чувствительностью релейной защиты* понимается ее способность реагировать на возможные повреждения в минимальных режимах работы системы электроснабжения, когда изменение возмущающей величины минимально. По отношению к каждому комплекту защиты это требование определяется необходимостью обеспечить срабатывание защиты при повреждении в пределах защищаемой зоны. Обычно стремятся сделать защиту возможно более чувствительной, сохраняя, однако, ее селективность, что и ставит практический предел возможной чувствительности защиты. С ростом нагрузок систем электроснабжения и увеличением длины линий электропередачи значения токов и напряжений при к.з. приближаются к их значениям в нормальных режимах. В связи с этим удовлетворить требование чувствительности бывает трудно даже при металлических к.з.

Чувствительность защиты оценивают *коэффициентом чувствительности*. Он регламентирует отношение между значением возмущающей величины при металлическом коротком замыкании в защищаемой зоне и установленным на защите значением параметра ее срабатывания. Так, для защит, реагирующих на электри-

ческие величины, возрастающие при коротких замыканиях (максимальные защиты), коэффициент чувствительности определяется отношением минимального значения входной воздействующей величины к установленному на защите значению параметра срабатывания. Для защит, реагирующих на электрические величины, уменьшающиеся при повреждении (минимальные защиты), коэффициент чувствительности имеет обратную зависимость. Он определяется отношением установленного на защите значения параметра срабатывания к максимальному значению входной воздействующей величины. Правилами устройств электроустановок (ПУЭ) определены необходимые минимальные коэффициенты чувствительности для различных защит и защищаемых элементов [3].

Чувствительность — одно из основных требований, предъявляемых и к устройствам автоматики. Высокой чувствительностью должны обладать, например, устройства автоматической частотной разгрузки, автоматические регуляторы возбуждения и автоматические регуляторы частоты вращения синхронных генераторов. Что касается устойчивости быстроты срабатывания при внутренних к. з., то она имеет смысл при оценке функционирования в основном защит с абсолютной селективностью. Достоинством этих защит является быстроедействие. Однако они могут работать с замедлением, например, из-за влияния переходных процессов при к. з. в защищаемой зоне. Защита должна удовлетворять требованию устойчивости функционирования также при внешних к. з. и нормальных режимах. В этих случаях за счет отстроенности от входных воздействующих величин должна обеспечиваться устойчивость несрабатывания защиты.

Надежность функционирования. В устройствах релейной защиты и автоматики сигналы в процессе преобразования и передачи могут искажаться и ослабляться из-за помех и неисправностей отдельных функциональных элементов, что приводит к отказам функционирования, поэтому устройства защиты и автоматики должны выполняться с определенной степенью надежности. Под надежностью систем энергетики понимают свойство объекта выполнять задание функции в заданном объеме при определенных условиях эксплуатации. Это определение можно распространить и на устройства релейной защиты и автоматики, учитывая специфику их функционирования. Вопросам надежности релейной защиты посвящен ряд основополагающих работ. Наиболее полно эта проблема изложена в [10]. Очевидно, что для обеспечения требуемой надежности устройства релейной защиты и автоматики должны выполняться с применением высококачественных и надежно работающих реле и других элементов. Их монтаж должен быть надежным, т. е. таким, при котором исключаются обрыв проводов, замыкание между ними, срабатывание реле от механических воздействий и других помех. Существенное значение для надеж-

ности имеют правильная эксплуатация устройства, систематический профилактический контроль его технического состояния и послеаварийные проверки, целью которых являются поиск, обнаружение и устранение неисправностей. Для этого до последнего времени широко применяются так называемые внешние средства диагностирования. Они требуют высокой квалификации обслуживающего персонала и больших затрат времени. Новое направление в теории и практике релейной защиты — автоматизация диагностирования. Это особенно необходимо в связи с использованием в устройствах релейной защиты и автоматики в качестве элементной базы интегральных микросхем и средств микропроцессорной техники.

Такие устройства снабжаются встроенными средствами тестового и функционального контроля [11]. Они позволяют выявлять неисправности, приводящие к отказам функционирования релейной защиты.

При *тестовом диагностировании* искусственно создается ситуация, при которой устройство защиты должно сработать. Для этого на его вход подаются соответствующие диагностические сигналы. По реакции элементов релейной защиты на эти сигналы судят о ее состоянии. Реакция оценивается характером и совокупностью сигналов, зафиксированных в контрольных точках устройства. Эти сигналы при помощи специальной таблицы неисправностей позволяют судить о состоянии защиты и в случае ее неисправности определить поврежденный элемент. Для сокращения затрат времени на проведение тестового контроля в некоторых устройствах релейной защиты предусматриваются автоматические дешифраторы контролируемых сигналов. Они сравнивают эти сигналы с эталонными, характеризующими исправное состояние релейной защиты, и при нарушении соответствия между ними фиксируют неисправность. В дальнейшем поврежденный элемент отыскивается неавтоматически, так как дешифраторы, способные выполнять и эту функцию, значительно усложняют устройство тестового контроля.

При *функциональном контроле* неисправности обнаруживаются в результате обработки информации о реакции устройства релейной защиты на сигналы, поступающие непосредственно от защищаемого элемента системы электроснабжения. Распространены устройства функционального контроля, которые выявляют ложные срабатывания отдельных органов защиты по факту их длительного пребывания в состоянии срабатывания. Устройства функционального контроля, предупреждающие возможные отказы срабатывания и излишние срабатывания, основаны на сравнении поведения отдельных органов защиты, реагирующих на изменения одной и той же входной воздействующей величины при к.з. в системе электроснабжения. Свидетельством неисправности является несоответствие в их поведении.

Рассмотренные свойства защиты и автоматики обеспечивают *эффективность функционирования* этих устройств, под которой понимают свойство выполнять предельное число функций, каждую с предельным эффектом. Для оценки эффективности функционирования релейной защиты используется усредненный статистический показатель h ее работы, называемый *процентом правильных действий*:

$$h = n_{п.с} \cdot 100 / (n_{п.с} + n_{о.с} + n_{и.с} + n_{л.с}), \quad (В. 1)$$

где $n_{п.с}$, $n_{и.с}$, $n_{л.с}$ — число правильных, излишних и ложных срабатываний соответственно; $n_{о.с}$ — число отказов срабатывания.

§ В.5. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Устройства релейной защиты. Так как при коротких замыканиях в системе электроснабжения обычно возрастает ток и снижается напряжение, входными сигналами измерительной части устройств релейной защиты являются воздействующие величины, сформированные с использованием токов и напряжений защищаемых элементов. Характер воздействующей величины в той или иной мере определяет принцип действия защиты. По способу обеспечения селективности при внешних к.з. защиты, как указывалось выше, относят к двум группам: защиты с относительной селективностью и защиты с абсолютной селективностью. Рассмотрим принципы их выполнения.

Защиты с относительной селективностью. В эту группу входят токовые, токовые направленные и дистанционные защиты. Очевидно, сюда можно отнести и защиты напряжения. Общим для всех этих защит является то, что время срабатывания защиты зависит от расстояния между местом ее включения и точкой к.з. С увеличением расстояния увеличивается и время срабатывания. Это, а также соответствующий выбор параметров срабатывания измерительных органов обеспечивают селективное действие защиты при внешних к.з. Для обеспечения селективности направленных защит необходимо дополнительно контролировать направление мощности короткого замыкания. Время срабатывания защиты принято называть *выдержкой времени*. Распространение получили защиты со ступенчатыми (рис. В.11, а), непрерывно зависящими (рис. В.11, б) и комбинированными (рис. В.11, в) характеристиками выдержек времени. Защита со ступенчатой характеристикой обычно содержит три ступени. Каждая ступень характеризуется выдержкой времени и защищаемой зоной. На рис. В.12 показаны в совмещенном виде характеристика выдержек времени и защищаемые зоны трехступенчатой защиты А1 линии АВ. Выдержка времени первой ступени t_1^1 специально не устанавливается. Она определяется быстродействием измерительных органов и

других элементов устройства защиты и обычно не превышает 0,1 с. При этом невозможно обеспечить и защиту всей линии AB и исключить излишние срабатывания первой ступени при к.з. в начале смежной линии BB , поэтому для предотвращения излишних срабатываний защищаемая зона l_1^I охватывает только часть линии. Повреждения в конце линии AB ликвидируются второй ступенью защиты. Ее защищаемая зона l_1^{II} охватывает также шины

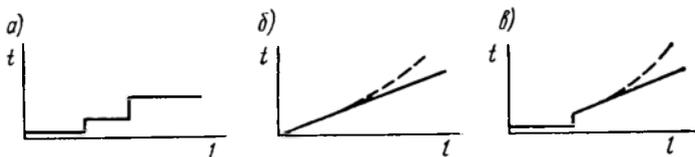


Рис. В.11. Виды характеристик выдержек времени защит $t = f(l)$ с относительной селективностью

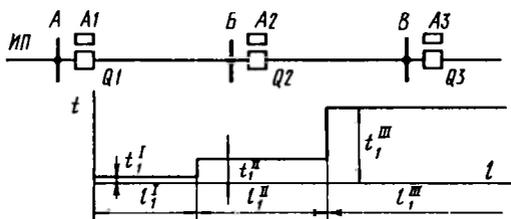


Рис. В.12. Характеристика $t = f(l)$ трехступенчатой защиты $A1$

и часть линии BB . Исключение неселективных срабатываний второй ступени достигается выбором выдержки времени $t_1^{II} = 0,5$ с. При этом вторая ступень резервирует работу первой ступени (ближнее резервирование), а также может осуществлять дальнейшее резервирование при к.з. в пределах своей защищаемой зоны. Третья ступень предназначена в основном для дальнего резервирования. Она резервирует также работу первой и второй ступеней. Ее защищаемая зона выходит за пределы смежных элементов (линия BB), а выдержка времени t_1^{III} выбирается по так называемому ступенчатому принципу. В зависимости от места включения защиты в системе электроснабжения t_1^{III} может достигать нескольких секунд.

Токовые защиты. Токовыми называются защиты, для которых воздействующей величиной является ток, проходящий в месте их включения. Первыми токовыми защитами, и вообще первыми защитами, были плавкие предохранители. В системах электроснабжения, особенно в сетях напряжением до 1 кВ, они и сейчас широко применяются наряду с устройствами токовой релейной защиты, измерительными органами которой выступают измеритель-

ные реле тока. Они включаются на полные токи фаз и на их симметричные составляющие. Параметрами защиты, требующими определения, являются *ток срабатывания, выдержка времени и коэффициент чувствительности*. Под *током срабатывания защиты* $I_{с.з}$ понимают минимальный ток в фазах защищаемого элемента (первичный ток), при котором защита срабатывает, т. е. на ее выходе появляется воздействие на отключение выключателя. Ток, проходящий при этом в реле (измерительном органе тока), называется *током срабатывания реле* $I_{с.р}$. Параметром защиты является также *ток возврата* $I_{в.з}$. Это максимальный ток в фазах защищаемого элемента, при котором защита возвращается в исходное состояние после действия. Ток в измерительном органе (реле тока), соответствующий току возврата защиты, называется *током возврата реле* $I_{в.р}$.

Для первичных реле $I_{с.з} = I_{с.р}$; $I_{в.з} = I_{в.р}$. Токи срабатывания и возврата связаны *коэффициентом возврата* $k_{в} = I_{в.р} / I_{с.р} = I_{в.з} / I_{с.з}$. В общем случае токовые защиты выполняются трехступенчатыми. Первая ступень называется *токовой отсечкой без выдержки времени*; вторая — *токовой отсечкой с выдержкой времени*; третья — *максимальной токовой защитой*. В трехступенчатой защите требуют определения токи срабатывания $I_{с.з}^I, I_{с.з}^{II}, I_{с.з}^{III}$ и выдержки времени t^I, t^{II}, t^{III} отдельных ступеней, а также их коэффициенты чувствительности $k_{ч}^I, k_{ч}^{II}, k_{ч}^{III}$, под которыми понимают отношение минимального значения тока в реле I_p при повреждении в защищаемой зоне той или иной ступени к току срабатывания реле $I_{с.р}$ соответствующей ступени. В токовых защитах со ступенчатой характеристикой выдержек времени каждая ступень имеет неизменную выдержку времени, она не зависит от тока в защищаемом элементе. Поэтому такие защиты называются *защитами с независимыми характеристиками выдержек времени*. В системах электрооборудования применяются также токовые защиты с комбинированными характеристиками, третья ступень которых имеет ограниченно зависимую характеристику. При этом довольно часто защита содержит только две ступени: первую и третью (рис. В.11, в).

Токовые направленные защиты, как и токовые, обычно выполняются трехступенчатыми. Однако поведение защит при к.з. определяется не только значением тока повреждения, но и направлением мощности короткого замыкания в месте их включения. Контроль направления мощности к.з. становится необходимым, если защищаемый элемент имеет двустороннее питание. В самом деле, при к.з. в точках K_1 и K_2 (рис. В.13, а, б) токи короткого замыкания в месте включения токовой защиты $A1$ и $A2$ в общем случае соизмеримы, причем в первом случае должна сработать защита $A1$, а во втором — защита $A2$. Выбором выдержки времени добиться этого невозможно, поэтому селективность защиты или отдельных ее ступеней не обеспечивается. Однако нетрудно заметить, что при к.з. на защищаемой линии $Л1$ (точка K_1) мощность

$S_{к1}$ направлена от шин в защищаемую линию, а при повреждении смежной линии $Л2$ (точка $К_2$) мощность $S_{к2}$ у места включения защиты $A1$ изменила направление. В первом случае защита $A1$ должна сработать и отключить линию $Л1$, а во втором работать не должна. Для достижения этого токовая защита дополняется измерительным органом, контролирующим направление мощности короткого замыкания. Он называется *органом направления мощности*. При этом некоторые ступени защиты, например первая, могут выполняться ненаправленными. Параметры, подлежащие определению, те же, что и у токовых защит. Входными воздействующими

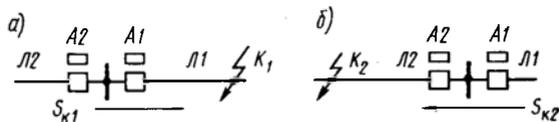


Рис. В.13. Схема сети с двусторонним питанием, поясняющая необходимость выполнить защиты направленными

щими величинами защиты могут быть полные фазные токи и напряжения или их симметричные составляющие.

Дистанционные защиты. При к.з. в связи с увеличением тока I и уменьшения напряжения U в защищаемом элементе отношение U/I в месте включения защиты оказывается меньше этого отношения в нормальном режиме. Оно уменьшается по мере приближения точки к.з. к источнику питания. Поэтому защиту от к.з. можно выполнить реагирующей на изменение указанного отношения, которое, согласно ГОСТ 16022—83, называется ее *характеристической величиной*. Такая защита называется дистанционной: при выполнении определенных условий отношение подведенных к реле напряжения и тока пропорционально расстоянию (дистанции) от места включения защиты до точки к.з. Соответствующие измерительные реле называются минимальными реле сопротивления. Иногда в схему защиты вводят пусковой орган, например реле тока. Дистанционные защиты выполняют ненаправленными и направленными со ступенчатыми, непрерывно зависящими и комбинированными характеристиками выдержек времени. Таким образом, в общем случае дистанционная защита имеет три измерительных органа: минимальное реле сопротивления, реле тока и реле направления мощности. Параметрами защиты, подлежащими определению, являются сопротивление срабатывания защиты $Z_{с.з.}$, ток срабатывания защиты $I_{с.з.}$ (при наличии токового пускового органа) и выдержка времени.

Защиты напряжения. Для них воздействующей величиной является напряжение цепи в месте включения защиты, поэтому в качестве измерительного органа защиты используют реле напря-

жения, которые срабатывают, если напряжение в месте включения защиты достигает заданного значения. В системах электроснабжения наиболее распространена минимальная защита напряжения. Она обычно содержит две ступени.

Защиты с абсолютной селективностью основаны на сравнении однородных электрических величин по концам защищаемого участка или в соответствующих ветвях параллельно соединенных элементов электрической установки, или же в нескольких элементах, присоединенных к общим шинам. В возможности выполнить абсолютно селективную защиту, т. е. способную срабатывать только при внутренних к.з., можно убедиться рас-

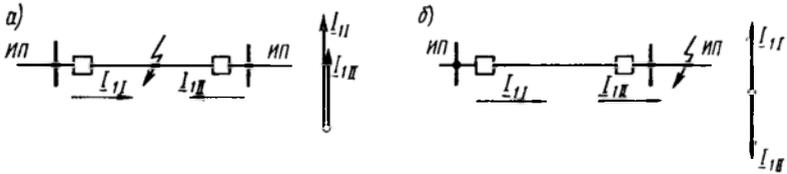


Рис. В.14. Сеть с двусторонним питанием и векторные диаграммы, поясняющие действие продольной дифференциальной токовой защиты при к.з. в зоне (а) и при повреждении вне зоны (б)

смотрев, например, линию с двусторонним питанием (рис. В.14). Если за условное положительное направление токов I_{II} и I_{III} принять направление от шин в линию, то повреждение на защищаемой линии (рис. В.14, а) отличается от внешнего к.з. (рис. В.14, б), нормального режима и качаний прежде всего углом сдвига фаз между сравниваемыми токами. Абсолютные значения токов I_{II} и I_{III} при внутренних к.з. в общем случае разные, в случае одностороннего питания один из токов вообще отсутствует. Таким образом, сравнивая токи I_{II} и I_{III} по абсолютному значению и фазе или только по фазе, можно выполнить защиту, способную отличить внутреннее к.з. от внешних без использования выдержки времени. Сравнить можно также знаки мощностей к.з. по концам защищаемой линии. Полная мощность к.з. всегда направлена к месту повреждения, поэтому при тех же, что и для токов, условных положительных направлениях знаки мощностей при внутренних к.з. одинаковы, а при внешних к.з. — разные. Можно показать, что и в электроустановках с параллельно соединенными элементами можно выполнить защиту с абсолютной селективностью, сравнивая комплексы, фазы и абсолютные значения токов, а также мощности. При выполнении защит с абсолютной селективностью сравнивать электрические величины можно или непосредственно, или косвенно. В первом случае защиты называются *дифференциальными токовыми либо дифференциальными направленными*, если сравниваются знаки мощностей. В свою очередь, дифференциальные токовые защиты бывают продольными и поперечными.

ми. *Продольные дифференциальные токовые защиты* осуществляют сравнение токов по концам защищаемого элемента, а *поперечные дифференциальные токовые* — в параллельных цепях электроустановки. Применяются также *поперечные дифференциальные токовые направленные защиты*, сравнивающие значения и знаки мощностей в параллельных цепях. При косвенном сравнении электрических величин защиты с абсолютной селективностью выполняют на основе защит с относительной селективностью, например токовых направленных. Для этого необходимо согласовать действия защит $A1$ и $A2$, расположенных, например, по концам защищаемой линии AB (рис. В.15). В соответствии с принципом выполнения они срабатывают при к.з. в точке K_1 на линии, когда в месте включения защит мощность к.з. направлена от шин в линию, т. е. имеют одинаковые знаки (рис. В.15, а). При внешних повреждениях, когда в месте включения одной из защит мощность к.з. направлена к шинам, эта защита не срабатывает (рис. В.15, б). Таким образом, поведение защит при к.з. в защищаемой зоне (линия AB) отличается от их поведения при внешних повреждениях.

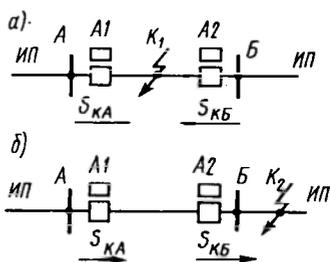


Рис. В.15. Размещение токовых направленных защит в сети с двусторонним питанием и направление мощности к.з. при повреждении защищаемой линии (а) и вне ее (б)

При наличии канала связи можно обеспечить обмен информацией между защитами. Каждая из защит, например, может передавать при срабатывании разрешающий сигнал на срабатывание другой защите. При отсутствии такого сигнала защита срабатывать не должна, хотя мощность к.з. у места ее включения имеет направление от шин в линию. По каналу связи можно организовать также обмен блокирующими сигналами, препятствующими срабатыванию защит при внешних к.з. Аналогично можно согласовывать действие ненаправленных защит.

Устройства автоматики. Они состоят из устройств автоматического управления и устройств автоматического регулирования. В системах электроснабжения основными устройствами автоматического управления являются устройства АЧР, АВР, АПВ, а автоматического регулирования — устройства АРН и АРВ. К устройствам автоматического регулирования можно, очевидно, отнести и автоматические синхронизаторы.

Устройства автоматической частотной разгрузки (УАЧР). Воздействующей величиной устройства АЧР является напряжение, частоту которого контролирует измерительный орган — реле частоты. Реле срабатывает при снижении частоты до заданного значения. Действие УАЧР во многом аналогично действию защиты с относительной селективностью. И здесь селективность достигается выбором параметра срабатывания (частоты

срабатывания) измерительного органа и выдержкой времени. При срабатывании УАЧР отключает определенную часть потребителей, способствуя восстановлению частоты в системе электроснабжения.

Устройства автоматического включения резерва (УАВР) и автоматического повторного включения (УАПВ). В системах электроснабжения устройство АВР контролирует положение выключателя рабочего источника питания и при его аварийном отключении включает резервный источник питания, а устройство АПВ действует на включение выключателя, например, линии электропередачи после отключения ее релейной защитой. При этом в отличие от релейной защиты, для которой воздействующая величина имеет обычно характер непрерывного сигнала, на вход УАВР и УАПВ подаются дискретные сигналы, несущие информацию о положении контролируемого выключателя. Поэтому в устройствах АВР и АПВ отсутствуют измерительные органы. Положение выключателя фиксируется его вспомогательными контактами, замкнутыми при одном положении выключателя и разомкнутыми при другом. В первом случае их сопротивление близко к нулю, а во втором — очень велико. Это сопротивление и является входным дискретным сигналом УАВР и УАПВ.

Автоматические регуляторы напряжения (АРН) предназначены для поддержания напряжения на необходимом уровне в нормальном режиме работы системы электроснабжения. Измерительный орган АРН преобразует непрерывный входной сигнал, пропорциональный отклонению напряжения, в дискретный сигнал с учетом знака отклонения. Простейший измерительный орган можно выполнить двумя реле напряжения: минимальным и максимальным. Соответствующее отклонение напряжения в ту или иную сторону сопровождается срабатыванием одного из реле. Это используют для управления объектом регулирования. В системах электроснабжения объектами регулирования являются конденсаторные установки и трансформаторы с устройствами РПН. Автоматический регулятор напряжения конденсаторных установок в зависимости от знака отклонения напряжения включает или отключает всю конденсаторную установку или отдельные ее секции. На трансформаторах с УРПН регулятор в зависимости от знака отклонения напряжения путем переключений изменяет число витков одной из обмоток трансформатора.

Автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) в отличие от АРН не только поддерживают напряжение в нормальных режимах, но и повышают устойчивость параллельно работающих генераторов и облегчают самозапуск электродвигателей при авариях. Объектом регулирования являются синхронные машины: генераторы, компенсаторы, электродвигатели. Сущность АРВ состоит в том, что автоматический регулятор воспринимает изменение напряжения или других электрических величин (напри-

Рис. В.16. Векторная диаграмма, поясняющая появление напряжения биения



мер, тока) и преобразует их в изменения тока возбуждения синхронной машины. Если АРВ реагирует на знак и значение отклонения входных сигналов, то его относят к автоматическим регуляторам пропорционального действия. В отличие от них автоматические регуляторы сильного действия реагируют не только на знак и значение входных сигналов, но и на скорости их изменения.

Автоматические синхронизаторы. В общем случае при раздельной работе синхронного генератора и системы электроснабжения амплитуды, частоты и фазы их напряжений не одинаковы (рис. В.16), поэтому при включении генератора в сеть появляется уравнивающий ток, пропорциональный напряжению U_s (напряжение биения). С изменением угла δ от нуля до 2π напряжение биения изменяется от минимального значения при $\delta=0$ и при $\delta=2\pi$ до максимального значения при $\delta=\pi$. Подобным образом изменяется и уравнивающий ток, который представляет опасность для синхронизируемого генератора. Это заставляет принимать меры, обеспечивающие включение генератора при напряжении U_s , близком к нулю, т. е. при $\underline{U}_r = \underline{U}_c$ и $\delta=0$. Достигается это уравниванием амплитуд сравниваемых напряжений и их частот f_r и f_c . Поэтому функциями автоматического синхронизатора являются регулирование напряжения и частоты вращения синхронизируемого генератора путем воздействия на АРВ и автоматический регулятор частоты вращения турбины, а также определение момента подачи команды на включение выключателя.

ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Устройства релейной защиты и автоматики, как отмечалось выше, состоят из функциональных элементов, поэтому принципы действия этих устройств, их выполнение можно понять изучив предварительно общие принципы работы, характеристики и способы реализации функциональных элементов. Для этой цели в учебном плане подготовки инженера по автоматизации и релейной защите электроэнергических систем предусмотрена специальная дисциплина и написаны основополагающие учебники и учебные пособия.

Для инженеров, специализирующихся в области электроснабжения, такая дисциплина в учебном плане отсутствует, поэтому функциональные элементы рассматриваются как составная часть дисциплины «Релейная защита и автоматика систем электроснабжения».

Необходимо подчеркнуть, что в системах электроснабжения наряду с устройствами релейной защиты и автоматики, выполненными на основе полупроводниковой и микропроцессорной элементной базы, продолжают применяться простейшие устройства, использующие электромеханические и электротепловые элементы. Эти элементы, совершенствуясь, будут находить применение и в будущем. Поэтому рассмотрение и этих элементов в учебнике является целесообразным. Для выполнения устройств релейной защиты и автоматики на любой элементной базе требуются линейные и нелинейные измерительные преобразователи синусоидальных напряжений и токов, такие, например, как трансформаторы, трансреакторы, фильтры симметричных составляющих, выпрямители и др. Они также рассматриваются в настоящем разделе.

Глава 1

ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИНУСОИДАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ

§ 1.1. ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА

К измерительным органам воздействующая величина — ток — обычно подводится от *первичных измерительных преобразователей тока*. Они обеспечивают изоляцию цепей тока измерительных органов от высокого напряжения и позволяют независимо от номинального первичного тока получить стандартное значение вторичного тока. Наиболее распространенными первичными преобразователями тока являются измерительные трансформаторы тока *ТА*. В системах электроснабжения применяют также измерительные преобразователи тока, названные магнитными трансформаторами тока (МТТ). На их основе разработаны так называемые дискретные трансформаторы тока (ДТТ).

Измерительные трансформаторы тока. Они имеют стандартный номинальный вторичный ток $I_{2 \text{ ном}} = 1; 5 \text{ А}$ при любых значениях номинального первичного тока $I_{1 \text{ ном}}$; допускается изготовление трансформаторов тока с номинальным вторичным током $I_{2 \text{ ном}} = 2; 2,5 \text{ А}$. Трансформаторы тока используют и в сетях напряжением до 1 кВ.

Для правильного действия особенно релейной защиты требуется точная работа трансформаторов тока при токах перегрузки электроустановки и токах к.з., которые во много раз могут превышать их номинальные первичные токи, особенно в сетях напряжением до 1 кВ. Правильная работа быстродействующих устройств защиты и автоматики должна обеспечиться при переходных процессах в трансформаторах тока. Особенностью измерительных трансформаторов тока является режим короткого замыкания (близкий к короткому замыканию) его вторичной цепи. Первичная обмотка трансформатора *ТА* с числом витков w_1 включается в цепь первичного тока I_1 сети, а ко вторичной обмотке с числом витков w_2 подключаются цепи тока измерительных органов, например измерительных реле тока *КА1, КА2* с относительно малым сопротивлением (рис. 1.1, *а*). Начала и концы обмоток трансформатора тока указываются на их выводах. Выводы первичной обмотки L_1 и L_2 маркируются произвольно, а выводы вторичной обмотки I_1 и I_2 — с учетом принятого обозначения выводов первичной обмотки. При этом за начало вторичной обмотки I_1 принимается вывод, из которого мгновенный ток i_2 направляется в цепь нагрузки, когда в первичной обмотке ток i_1 направлен от начала L_1 к концу L_2 . При такой маркировке мгновенное значение тока

в обмотке реле имеет то же направление, что и при включении непосредственно в защищаемую цепь (без трансформатора).

На рис. 1.1, а показаны направления токов i_1 , i_2 для некоторого момента времени и принятой намотки витков. Направление магнитного потока Φ_i при заданном направлении тока i_1 определяется по правилу буравчика. Ток i_2 всегда направлен так, что размагничивает магнитопровод. При этом результирующий магнитный поток Φ , согласно закону полного тока, создается совместным

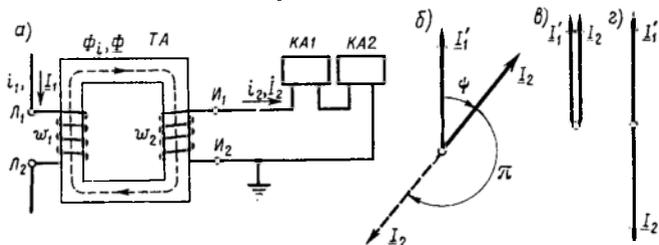


Рис. 1.1. Измерительный трансформатор тока и векторные диаграммы токов

действием магнитодвижущих сил (МДС) $i_1\omega_1$ и $i_2\omega_2$ обеих обмоток. Соотношение синусоидальных токов (напряжений, потоков и др.) изображается обычно векторной диаграммой. Векторная диаграмма может быть изображена и имеет определенный смысл только при условии, что для каждой из величин выбрано условное положительное направление. Так, из диаграммы (рис. 1.1, б) следует, что ток \underline{I}_2 отстает по фазе от тока \underline{I}_1' на угол ψ . Это означает, что ток i_2 достигает, например, положительного максимального мгновенного значения позже, чем ток i_1 , на время $t = \psi/\omega$. Однако указанный момент времени становится неопределенным, если неизвестно, какое из двух возможных направлений тока \underline{I}_2 считается положительным. Если для одного положительного направления ток \underline{I}_2 отстает по фазе от тока \underline{I}_1' на угол ψ , для другого (противоположного) направления тока \underline{I}_2 (при неизменном положительном направлении тока \underline{I}_1') угол сдвига фаз равен $\psi + \pi$ (на рис. 1.1, б показано пунктиром). Поэтому при построении векторной диаграммы первичного и вторичного токов трансформатора тока ТА необходимо задаться их условными положительными направлениями. Если для первичного тока \underline{I}_1 принять положительное направление от начала к концу обмотки, а для вторичного \underline{I}_2 — от конца к началу обмотки, как показано стрелками на рис. 1.1, а, то векторы МДС первичной и вторичной обмоток оказываются направленными противоположно. При этом, согласно закону полного тока,

$$\underline{I}_1\omega_1 - \underline{I}_2\omega_2 = \underline{F}_{\text{нам}}. \quad (1.1)$$

Результирующая МДС $\underline{F}_{\text{нам}}$ создается частью тока \underline{I}_1 , которая называется *током намагничивания* $\underline{I}_{\text{нам}}$, т. е. $\underline{F}_{\text{нам}} = \underline{I}_{\text{нам}} \omega_1$.

В идеальном трансформаторе результирующая МДС $\underline{F}_{\text{нам}} = 0$. При этом

$$\underline{I}_1 \omega_1 - \underline{I}_2 \omega_2 = 0 \quad (1.2)$$

или

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \omega_1 / \omega_2 = \underline{I}'_1. \quad (1.3)$$

Токи \underline{I}_2 и \underline{I}'_1 равны и совпадают по фазе. На векторной диаграмме их изображают одним вектором (рис. 1.1, в). Если положительное направление токов \underline{I}_1 и \underline{I}_2 принято от начала обмоток к их концам, то МДС обеих обмоток направлены одинаково, а то-

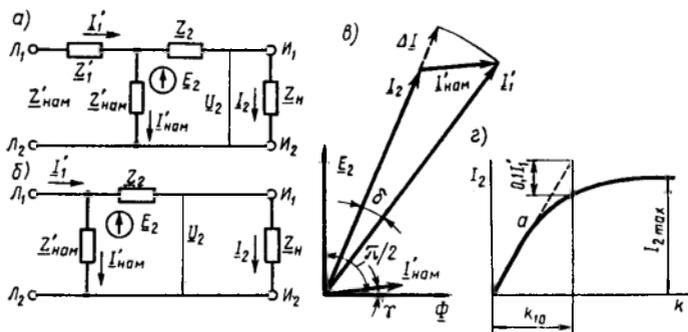


Рис. 1.2. Схемы замещения трансформатора тока, его векторная диаграмма и зависимость вторичного тока от кратности первичного тока

ки \underline{I}_2 и \underline{I}'_1 изображаются векторами, сдвинутыми по фазе на угол π (рис. 1.1, г). В дальнейшем при построении векторных диаграмм условное положительное направление тока \underline{I}_1 принимается от начала к концу обмотки, а тока \underline{I}_2 — от конца к началу (см. рис. 1.1, а, в). Для реального трансформатора и принятых условных положительных направлениях токов $\underline{I}_1 \omega_1 - \underline{I}_2 \omega_2 = \underline{I}_{\text{нам}} \omega_1$, откуда $\underline{I}_1 \omega_1 / \omega_2 = \underline{I}_2 + \underline{I}_{\text{нам}} \omega_1 / \omega_2$ или

$$\underline{I}'_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}'_{\text{нам}}. \quad (1.4)$$

Этому соответствует электрическая схема замещения трансформатора тока (рис. 1.2, а). Здесь ко вторичной обмотке приведены также сопротивления первичной обмотки Z_1' и ветви намагничивания $Z'_{\text{нам}}$. Эта схема принципиально не отличается от схемы замещения, например, силового трансформатора. В отличие от него трансформатор тока питается от источника тока. Поэтому первич-

ный ток \underline{I}_1 и МДС $\underline{I}_1\omega_1$ не зависят от режима работы трансформатора тока (от значения сопротивления нагрузки $\underline{Z}_н$).

Из схемы замещения видно, что сопротивление первичной обмотки \underline{Z}_1' не влияет на распределение тока между ветвью намагничивания $\underline{Z}'_{нам}$ и ветвью нагрузки $\underline{Z}_н$, поэтому из схемы, изображенной на рис. 1.2, б, в соответствии с которой построена векторная диаграмма (рис. 1.2, в), оно исключено.

За исходный при построении диаграммы принят ток намагничивания $\underline{I}'_{нам}$. Магнитный поток $\underline{\Phi}$ отстает от тока на некоторый угол γ , определяемый потерями в стали. Положительное направление ЭДС \underline{E}_2 принято совпадающим с положительным направлением тока \underline{I}_2 , т. е. от конца к началу вторичной обмотки. В связи с этим ЭДС \underline{E}_2 , наводимая потоком $\underline{\Phi}$ во вторичной обмотке, опережает его на угол $\pi/2$. В замкнутой вторичной обмотке проходит ток \underline{I}_2 , отстающий от ЭДС \underline{E}_2 на некоторый угол, определяемый соотношением составляющих R и jX сопротивлений \underline{Z}_2 и $\underline{Z}_н$.

По схеме замещения и выражению (1.4) определяют ток \underline{I}_1' . Из векторной диаграммы видно, что вторичный ток \underline{I}_2 отличается от приведенного первичного \underline{I}_1' по значению на ΔI и по фазе на угол δ . Ток $\underline{I}'_{нам}$ значительно меньше тока \underline{I}_1' , поэтому результирующая МДС $\underline{F}_{нам}$, определяющая рабочий магнитный поток $\underline{\Phi}$ и ЭДС \underline{E}_2 , во много раз меньше МДС первичной обмотки $\underline{I}_1\omega_1$. Очевидно, что чем меньше сопротивление нагрузки $\underline{Z}_н$, т. е. чем ближе режим цепи вторичной обмотки к режиму короткого замыкания, тем большая часть тока \underline{I}_1' замыкается по цепи вторичной обмотки и тем точнее работает трансформатор тока.

По мере увеличения сопротивления нагрузки $\underline{Z}_н$ ток \underline{I}_1' распределяется таким образом, что ток \underline{I}_2 уменьшается, а ток $\underline{I}'_{нам}$ увеличивается, т. е. трансформатор тока начинает работать с большими погрешностями. В пределе, когда $\underline{Z}_н = \infty$ (обмотка разомкнута), ток $\underline{I}_2 = 0$, а $\underline{I}'_{нам} = \underline{I}_1'$ и результирующая МДС резко возрастает. Она становится равной МДС первичной обмотки. Следствием этого является значительное увеличение магнитного потока $\underline{\Phi}$. При размыкании вторичной обмотки магнитопровод быстро насыщается, что обуславливает появление на разомкнутой обмотке трансформатора несинусоидальной ЭДС e_2 , максимальные мгновенные значения которой могут достигать тысяч и даже десятков тысяч вольт, что представляет опасность для обслуживающего персонала и изоляции. Наряду с этим в связи с увеличением магнитного потока возрастают потери в стали и магнитопровод трансформатора недопустимо перегревается, что может привести к усиленному износу или даже повреждению изоляции трансформатора тока. Таким образом, нормальным режимом работы трансформатора тока является режим короткого замыкания вторичной цепи с малой МДС $\underline{F}_{нам}$.

На точность работы трансформатора тока влияет не только нагрузка, но и значение первичного тока \underline{I}_1 . На рис. 1.2, г пред-

ставлена зависимость вторичного тока I_2 от кратности первичного тока $k = I_1/I_{1\text{ном}}$ для некоторой постоянной нагрузки Z_n . До точки перегиба (точка a) эта зависимость близка к прямолинейной. Дальнейшее увеличение первичного тока I_1 из-за насыщения магнитопровода трансформатора почти не приводит к росту вторичного тока, а ток намагничивания резко возрастает. Таким образом, точность трансформатора тока с ростом кратности k ухудшается. С увеличением нагрузки перегиб наступает при меньших кратностях тока. Точность работы трансформаторов тока характеризуют *токовая, полная и угловая погрешности*. Токсовая погрешность f_i определяется арифметической разностью между током I_2 и током I_1' (рис. 1.2, в) $f_i = 100\Delta I/I_1'$, а угловая погрешность δ — углом сдвига между этими токами. Согласно ГОСТ 7746—78Е, точность работы трансформаторов тока, предназначенных для релейной защиты, характеризуется полной погрешностью ϵ . Она пропорциональна геометрической разности между током I_2 и током I_1' , т. е. току намагничивания $I'_{\text{нам}}$. Из векторной диаграммы (рис. 1.2, в) следует, что $I'_{\text{нам}} > \Delta I$, поэтому $\epsilon > f_i$. Полная погрешность

$$\epsilon = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_2 K_I - i_1)^2 dt}, \quad (1.5)$$

где I_1 — действующее значение первичного тока, А; T — длительность периода тока, с; K_I — номинальный коэффициент трансформации (отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току). Трансформаторы тока, используемые в релейной защите, имеют два класса точности: 5Р и 10Р. Полная погрешность первых не должна превышать $\epsilon = 5\%$, а вторых — $\epsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и расчетной предельной кратности первичного тока.

Полная погрешность связана с *предельной кратностью* k_{10} трансформатора тока, представляющей собой наибольшее отношение первичного тока к его номинальному значению, при котором полная погрешность при заданной вторичной нагрузке не превышает $\epsilon = 10\%$. Предприятие-поставщик гарантирует значение предельной кратности для номинальной нагрузки (номинальная предельная кратность $k_{10\text{ном}}$). Трансформаторы тока выбираются так, чтобы полная погрешность не превышала $\epsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и кратности первичного тока, соответствующей условиям срабатывания защиты. При этом угловая погрешность не превосходит нескольких градусов, что допустимо. Рассмотренные соотношения и векторная диаграмма характерны и для вторичных измерительных трансформаторов тока, которые, как правило, входят в измерительную часть современных устройств защиты и автоматики.

Магнитные трансформаторы тока (МТТ) предназначены для дистанционного преобразования переменного тока. Основным элементом МТТ является его обмотка с разомкнутым магнитопроводом или без него, которая устанавливается в магнитном поле контролируемого тока на допустимом расстоянии от высоковольтного провода и имеет потенциал земли. При этом выходной сигнал МТТ (индуктированная в обмотке ЭДС) является функцией магнитного поля. Уровень этого сигнала зависит от расстояния между обмоткой МТТ и проводом и от их взаимной ориентации. При допустимых расстояниях уровень сигнала оказывается весьма малым. Если МТТ используется для контроля тока в проводе одной из фаз трехфазной электроустановки, то магнитные поля, создаваемые токами других фаз, могут создавать помехи. Имеются конструкции МТТ (типа ТВМ), практически свободные от этих недостатков. В системах электроснабжения магнитные трансформаторы тока нашли применение в устройствах токовых защит подстанций без выключателей со стороны высшего напряжения.

Дискретные трансформаторы тока (ДТТ). Основным элементом ДТТ является аналоговый первичный измерительный преобразователь тока. Им может быть любой трансформатор тока. Целесообразно, однако, использовать для этой цели МТТ. Его аналоговый сигнал при помощи аналого-дискретного преобразователя (АДП) преобразуется в последовательность дискретных сигналов, каждый из которых несет информацию о комплексном действующем значении контролируемого тока. Длительность сигнала отображает модуль тока, а положение переднего или заднего фронта сигнала на оси времени — фазу тока. Достоинство ДТТ состоит, в частности, в возможности расширить область применения дешевых, но маломощных МТТ. Наиболее полно теоретические основы и практическая реализация МТТ и ДТТ изложены в [12].

§ 1.2. ПЕРВИЧНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

К измерительным органам воздействующая величина — напряжение — обычно подводится от *первичных измерительных преобразователей напряжения*. Они, как и первичные измерительные преобразователи тока, обеспечивают изоляцию цепей напряжения измерительных органов от высокого напряжения и позволяют независимо от номинального первичного напряжения получить стандартное значение номинального вторичного напряжения $U_{2 \text{ ном}} = 100 \text{ В}$. Распространенной разновидностью первичного измерительного преобразователя напряжения является измерительный трансформатор напряжения *ТВ*.

Особенностью измерительного трансформатора напряжения является режим холостого хода (близкий к холостому ходу) его вторичной цепи (рис. 1.3, *а*). Первичная обмотка трансформатора *ТВ* с числом витков w_1 включается на напряжение сети \underline{U}_1 . Под действием напряжения по обмотке w_1 проходит ток намагничивания $\underline{I}_{\text{нам}}$, создающий в магнитопроводе магнитный поток Φ . Маг-

нитный поток, в свою очередь, наводит в первичной ω_1 и вторичной ω_2 обмотках ЭДС с действующими значениями соответственно $E_1 = 4,44f \times \omega_1 \Phi$, $E_2 = 4,44f \omega_2 \Phi$. Отсюда

$$E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2. \quad (1.6)$$

Отношение ω_1/ω_2 называется коэффициентом трансформации и обозначается K_U . В режиме холостого хода ток $I_2 = 0$, а ток в первичной обмотке $I_1 = I_{\text{нам}}$. При этом $U_2 = E_2$ и напряжение U_1 незначительно отличается от ЭДС E_1 . Поэтому

$$K_U = \omega_1/\omega_2 = U_1/U_2. \quad (1.7)$$

Работа трансформатора с нагрузкой Z_N (в виде, например, реле напряжения KV) сопровождается прохождением тока I_2 и увеличением (по сравнению с холостым ходом) тока I_1' (рис. 1.3, б). Эти токи создают падение напряжения ΔU в первичной и вторичной обмотках, вследствие чего $U_2 = U_1' - \Delta U$. Из векторной диаграммы (рис. 1.3, в) следует, что вторичное напряжение U_2 отличается от приведенного первичного U_1' по значению на ΔU и по фазе на угол δ . Поэтому трансформатор имеет две погрешности: погрешность напряжения $f_U = (\Delta U/U_1') 100$ или вследствие незначительного угла δ

$$f_U = [(K_U U_2 - U_1)/U_1] 100 \quad (1.8)$$

— угловую погрешность, которая определяется углом δ между векторами напряжений U_1' и U_2 .

Значения погрешностей трансформатора напряжения определяются падением напряжения ΔU , которое увеличивается с ростом вторичной нагрузки (тока I_2). Вместе с ним возрастают и погрешности, поэтому нормальным режимом работы трансформатора напряжения является режим, близкий к холостому ходу.

В условиях эксплуатации трансформатор напряжения может работать с различными погрешностями. В зависимости от погрешностей по ГОСТ 1983—77Е установлены четыре класса точности: 0,2; 0,5; 1 и 3 соответственно погрешностям напряжения f_U в процентах. Номинальная мощность трансформатора отнесена к опре-

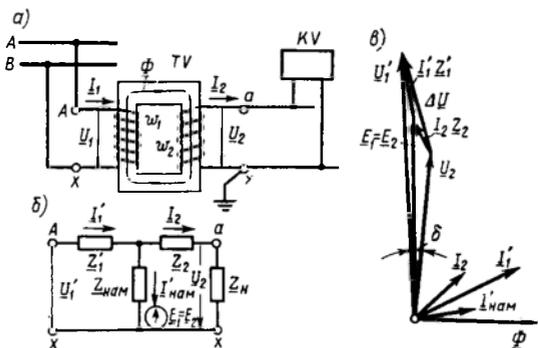


Рис. 1.3. Однофазный измерительный трансформатор напряжения (а), схема замещения (б) и векторная диаграмма (в)

деленному классу точности. Однако по условию нагрева он может допускать перегрузки в несколько раз, выходя при этом из заданного класса точности. Начала и концы обмоток трансформатора напряжения TU маркируются в соответствии с правилом, изложенным при рассмотрении трансформаторов тока (см. § 1.1). При этом напряжения \underline{U}_1 и \underline{U}_2 , направленные одинаково от одноименных концов обмоток (рис. 1.3, б), совпадают по фазе, если пренебречь падениями напряжения в обмотках трансформатора напряжения. Принято обозначать: A — начало первичной обмотки, a — начало вторичной обмотки; X — конец первичной обмотки, x — конец вторичной обмотки. Для трансформаторов напряжения, как и для трансформаторов тока, в зависимости от принятого положительного направления тока и напряжения можно построить векторные диаграммы с совпадающими или противоположно направленными векторами вторичного \underline{U}_2 и приведенного первичного \underline{U}_1' напряжений. При этом погрешности не учитываются. Для анализа действий релейной защиты и автоматики более удобна векторная диаграмма с совпадающими векторами \underline{U}_2 и \underline{U}_1' .

Рассмотренные соотношения и векторная диаграмма характерны и для вторичных измерительных трансформаторов напряжения, которые, как правило, входят в измерительную часть устройств защиты и автоматики.

Измерительные органы, в частности измерительные реле напряжения, включаются на фазные и междуфазные напряжения; а также на напряжения нулевой и обратной последовательностей. Для получения этих напряжений используются однофазные или трехфазные трансформаторы напряжения и фильтры напряжения обратной последовательности. Трансформаторы в этом случае имеют различные схемы соединения обмоток, при выполнении которых придерживаются следующих правил: в случае включения первичных обмоток на фазные напряжения их начала присоединяются к соответствующим фазам, а концы объединяются и соединяются с землей; при включении первичных обмоток на междуфазные напряжения их начала присоединяются к предыдущим, а концы — к последующим фазам в порядке их электрического чередования.

Включение однофазного трансформатора напряжения (рис. 1.4, а). Первичная обмотка трансформатора включается на напряжение двух любых фаз. Такая схема применяется в тех случаях, когда достаточно иметь одно междуфазное напряжение, например напряжение \underline{U}_{BC} .

Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в открытый (неполный) треугольник (рис. 1.4, б). Первичные обмотки двух однофазных трансформаторов напряжения включаются на два любых междуфазных напряжения. Вторичные обмотки соединяются последовательно. Такая схема дает возможность включать реле на все междуфазные напряжения (реле $KVI—KV3$) и на напряжения фаз по отношению к искусственной нейтральной точке системы междуфазных напряжений. В последнем случае включение можно выполнить тремя реле, обмотки которых имеют равные сопротивления и соединены в

звезду (реле $KV4—KV6$). Схема соединения двух однофазных трансформаторов в открытый треугольник является наиболее распространенной. Она не может применяться в тех случаях, когда необходимо иметь фазные напряжения относительно земли.

Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в звезду (рис. 1.4, в), как и рассмотренная схема соединения обмоток в открытый треугольник, дает возможность включать реле на любые междуфазные напряжения (ре-

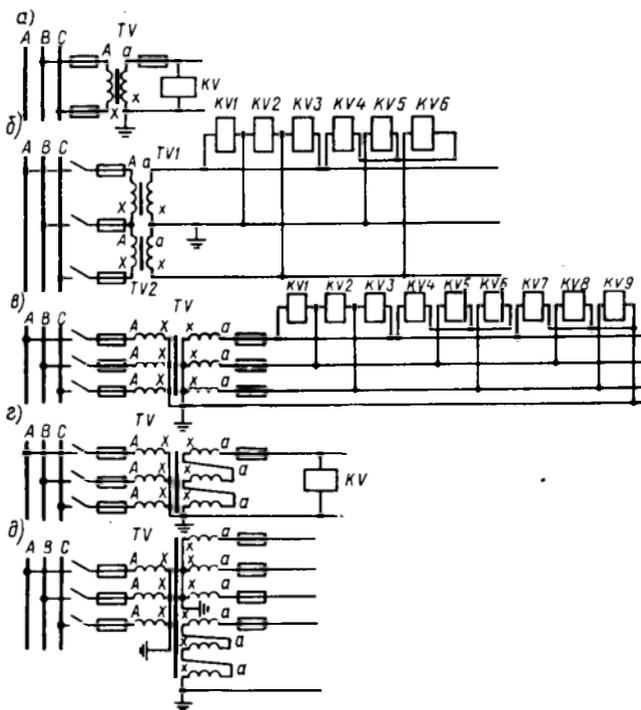


Рис. 1.4. Схемы соединения обмоток измерительных трансформаторов напряжения и реле

ле $KV1—KV3$) и на напряжения фаз относительно искусственной нейтральной точки системы междуфазных напряжений (реле $KV4—KV6$), а также по отношению к земле, т. е. на любые фазные напряжения (реле $KV7—KV9$).

Рассматриваемую схему можно выполнить посредством трех однофазных трансформаторов напряжения или одного трехфазного пятистержневого. Применение трехфазных трехстержневых трансформаторов напряжения в данном случае не допускается в связи с тем, что при замыкании на землю в сети по первичным обмоткам трансформатора через его заземленную нейтраль проходят большие токи намагничивания нулевой последовательности и трансформатор сильно перегревается.

Схема соединения обмоток трансформаторов напряжения в фильтр напряжения нулевой последовательности (рис. 1.4, г). Напряжения отдельных последовательностей можно выделить из полных фазных напряжений посредством фильтров напряжений симметричных составляющих. Так, для получения напря-

жения нулевой последовательности \underline{U}_0 первичные обмотки трансформаторов должны соединяться в звезду с заземленной нейтралью. Полученные при этом вторичные фазные напряжения суммируются путем соединения вторичных обмоток в *разомкнутый треугольник*, к которому подключается реле (рис. 1.4, з). Напряжение на обмотке реле

$$\underline{U}_p = (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)/K_U = 3\underline{U}_0/K_U.$$

При отсутствии в полных фазных напряжениях составляющих нулевой последовательности напряжение на выходе разомкнутого треугольника близко к нулю. В связи с погрешностью трансформаторов напряжения, наличием в первичных напряжениях гармонических, кратных трем, и по другим причинам на зажимах разомкнутого треугольника в нормальном режиме возникает *напряжение небаланса*, которое обычно не превышает $U_{нб} = 3 \dots 4$ В (при замыкании на землю максимальное напряжение на зажимах фильтра $3U_{0 \max} = 100$ В). Опыт эксплуатации свидетельствует, что трансформаторы напряжения с заземленной первичной обмоткой в сетях с изолированной нейтралью при замыканиях на землю часто повреждаются. Причинами повреждений являются феррорезонансные явления, вследствие которых через обмотки высшего напряжения трансформатора проходят токи, многократно превышающие номинальные значения. Поэтому сам трансформатор напряжения нуждается в защите.

Обычно трансформаторы напряжения изготавливают с двумя вторичными обмотками, одну из которых можно использовать в схеме соединения звезды, а другую — разомкнутого треугольника (рис. 1.4, д). В системах с заземленной нейтралью напряжение на зажимах разомкнутого треугольника при замыкании на землю не превышает фазного U_ϕ , а в системах с изолированной нейтралью оно может достигать $3U_\phi$, поэтому номинальное вторичное фазное напряжение обмоток, соединяемых в разомкнутый треугольник, принимается равным $U_{2ном} = 100$ В, если трансформатор устанавливается в системе с заземленной нейтралью, и равным $U_{2ном} = 100/3$ В, если трансформатор устанавливается в системе с изолированной или с заземленной через дугогасящий реактор нейтралью.

Выполнение вторичных цепей трансформаторов напряжения и контроль за их состоянием. Исходя из требований техники безопасности вторичные обмотки трансформаторов напряжения в установках напряжением 500 В и выше должны обязательно заземляться. Предохранители с первичной стороны трансформаторов напряжения не защищают их от перегрузок и коротких замыканий в их вторичных цепях. Поэтому все незаземленные провода, подключаемые к вторичным обмоткам трансформаторов напряжения, соединяются с ними через низковольтные плавкие предохранители или малогабаритные автоматические выключатели, которые являются более быстродействующими; они надежнее и удобнее предохранителей. Перегорание предохранителей или срабатывание автоматических выключателей и возможные обрывы в цепях напряжения могут повлечь за собой неправильное действие некоторых устройств защиты и автоматики. Поэтому они должны снабжаться специальными устройствами, автоматически выводящими их из действия при нарушениях цепей напряжения. В тех случаях, когда указанные нарушения непосредственно не приводят к неправильной работе устройств защиты и автоматики, достаточна сигнализация об исчезновении напряжения [13].

§ 1.3. РЕАКТОРЫ И ТРАНСРЕАКТОРЫ

Реактор LR состоит из обмотки ω и ферромагнитного магнитопровода (рис. 1.5, а). Ферромагнитные материалы, из которых выполняют магнитопровод реактора, имеют нелинейную характеристику намагничивания $B = f(H)$, что обуславливает уменьшение их магнитной проницаемости μ с увеличением напряженности маг-

нитного поля H (рис. 1.5, б). Индуктивное сопротивление реактора X_L пропорционально магнитной проницаемости μ , поэтому оно изменяется с изменением тока в обмотке реактора. Для уменьшения этой зависимости и обеспечения относительного постоянства сопротивления магнитопровод реактора выполняется разомкнутым (с воздушным зазором δ). Вместе с тем в ряде устройств, например в магнитных усилителях, используют так называемые управляемые реакторы, сопротивление которых путем соответствующего управления изменяют в требуемых пределах. Для этой цели на

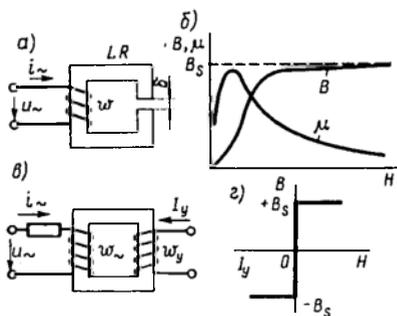


Рис. 1.5. Реакторы и характеристики магнитопровода

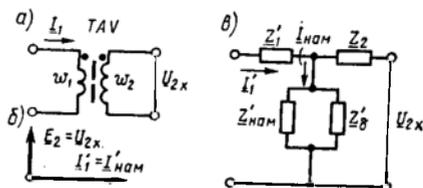


Рис. 1.6. Трансреактор, схема замещения и векторная диаграмма

замкнутом магнитопроводе реактора кроме основной обмотки предусмотрена обмотка управления w_y (рис. 1.5, в), по которой проходит постоянный ток управления I_y . Путем изменения этого тока изменяют магнитное состояние магнитопровода, его магнитную проницаемость и тем самым сопротивление X_L .

Однако, необходимо иметь в виду, что характеристики намагничивания ферромагнитных материалов, используемых в управляемых реакторах, имеют выраженный прямоугольный характер. С некоторым допущением их можно представить характеристикой, изображенной на рис. 1.5, г. При этом магнитопровод имеет два состояния: ненасыщенное ($-B_s < B < +B_s$) и насыщенное ($B = \pm B_s$). В первом случае μ и X_L бесконечно велики, а во втором равны нулю. Следовательно, процесс управления не сопровождается непрерывным изменением индуктивного сопротивления. Действительный характер явления подробно рассмотрен в [7].

В измерительных органах часто ток преобразуется в напряжение (ЭДС) путем включения в цепь тока балластных резисторов, реакторов, иногда конденсаторов. Однако в цепи тока можно включать лишь относительно малые сопротивления. Соответственно получают низкие напряжения, для повышения которых необходим трансформатор.

Трансреактор TAV выполняет функции реактора и трансформатора, преобразующих ток в напряжение. Он состоит из обмотки w_1 тока, разомкнутого магнитопровода и вторичной обмотки w_2 , находящейся в режиме, близком к холостому ходу (рис. 1.6, а). Поэтому ток I_1' в первичной обмотке является током намагничи-

вания, а напряжение холостого хода \underline{U}_{2x} равно ЭДС \underline{E}_2 вторичной обмотки (рис. 1.6, б). Напряжение \underline{U}_{2x} сдвинуто по фазе относительно тока \underline{I}_1' на угол, близкий к $\pi/2$. Преобразование определяется отношением \underline{U}_{2x} к \underline{I}_1' , равным для обычного трансформатора (см. рис. 1.2) сопротивлению намагничивания $\underline{Z}'_{нам}$, которое нелинейно зависит от тока \underline{I}_1' . Поэтому для обеспечения преобразования, близкого к линейному, магнитопровод трансреактора выполняют с зазором.

При этом в схему замещения параллельно сопротивлению $\underline{Z}'_{нам}$ включается постоянное сопротивление \underline{Z}'_{δ} , обусловленное воздушным зазором магнитопровода (рис. 1.6, в).

Для трансреактора

$$\underline{U}_{2x}/\underline{I}'_1 = \underline{Z}'_{нам}\underline{Z}'_{\delta}/(\underline{Z}'_{нам} + \underline{Z}'_{\delta}).$$

Очевидно, чем меньше \underline{Z}'_{δ} тем большее приближение к линейности обеспечивается.

§ 1.4. МАГНИТНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Простейший магнитный усилитель AL состоит из двух управляемых реакторов (рис. 1.7, а, б). Их основные (рабочие) обмотки переменного тока w_{\sim} соединяются последовательно согласно, а обмотки управления w_y — последовательно встречно. Этим обеспечивается взаимная компенсация ЭДС, трансформируемых из первичных рабочих обмоток в обмотки управления. При подведении к рабочим обмоткам переменного напряжения U_{\sim} по ним проходит ток I_H , который при неизменном напряжении U_{\sim} можно изменять, изменяя индуктивное сопротивление рабочих обмоток

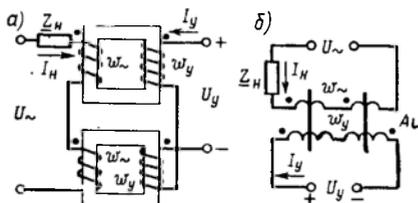


Рис. 1.7. Схема (а) и условное изображение (б) магнитного усилителя

X_L током I_y в обмотках управления. При увеличении тока I_y степень намагничивания сердечников увеличивается, их магнитная проницаемость и индуктивное сопротивление рабочих обмоток уменьшаются, а ток I_H возрастает. Если последовательно с обмотками w_{\sim} включается нагрузка \underline{Z}_H , то получается простейший усилитель, так как с помощью небольшой мощности постоянного тока, расходуемой в обмотках управления w_y , можно управлять значительно большей мощностью в цепи нагрузки.

Если ток нагрузки I_H , предварительно выпрямленный ($I_{o.c}$), пропустить по дополнительным обмоткам подмагничивания $w_{o.c}$, соединенным так же, как обмотки управления, то получится магнитный усилитель с положительной магнитной обратной связью

(рис. 1.8, а). Положительная обратная связь повышает усиление тока и мощности (чувствительность) магнитным усилителем. Роль положительной обратной связи станет понятна, если

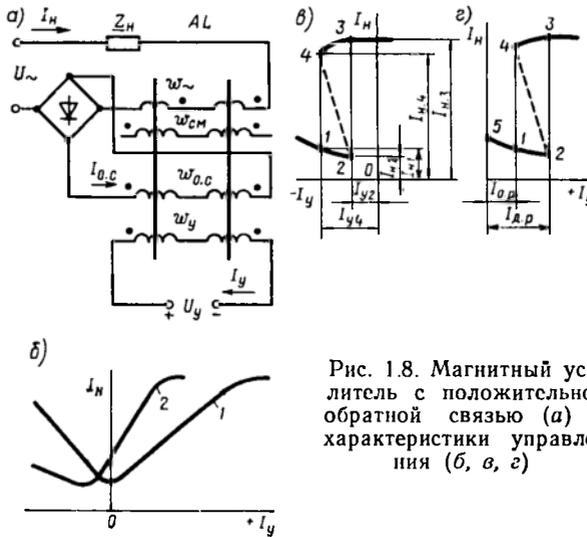


Рис. 1.8. Магнитный усилитель с положительной обратной связью (а) и характеристики управления (б, в, г)

рассмотреть рис. 1.8, б, где показаны характеристики управления магнитного усилителя без обратной связи (кривая 1) и с положительной обратной связью (кривая 2). Обратная связь смещает характеристику в сторону отрицательных значений тока I_y и увеличивает ее крутизну, т. е. увеличивает усиление тока. Степень обратной связи характеризуется коэффициентом обратной связи

$$k_{o.c} = \omega_{o.c} / \omega_{\sim}$$

По мере увеличения $k_{o.c}$ крутизна характеристики $I_n = f(I_y)$ увеличивается. При $k_{o.c} > 1$ магнитный усилитель переходит в релейный режим, а его характеристика приобретает S-образную форму, располагаясь в области отрицательных значений тока I_y (рис. 1.8, в). Это значит, что ток нагрузки I_n имеет максимальное значение, равное I_{n3} , при $I_y = 0$.

При непрерывном изменении тока I_y в сторону отрицательных значений до I_{y4} ток нагрузки скачкообразно уменьшается от значения I_{n4} до I_{n1} (точки 4, 1). При непрерывном уменьшении отрицательного тока I_y от значения I_{y4} до I_{y2} ток нагрузки скачкообразно возрастает до своего максимального значения (точки 2, 3).

Таким образом, при работе магнитного усилителя в релейном режиме ток нагрузки I_n имеет два устойчивых значения. Переход от одного значения к другому происходит скачкообразно.

Такой магнитный усилитель может выполнять функции измерительного реле, например максимального реле тока, при условии,

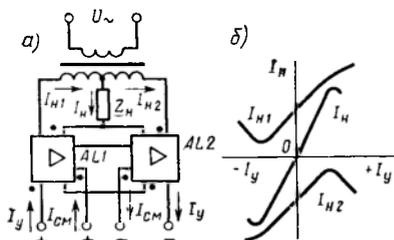


Рис. 1.9. Реверсивный магнитный усилитель (а) и характеристики управления (б)

уменьшении тока до $I_{o.p.}$ Для смещения характеристики магнитного усилителя предусматривается дополнительная подмагничивающая обмотка смещения ω_{cm} (рис. 1.8, а).

Рассмотренные магнитные усилители позволяют изменять ток в цепи нагрузки I_n только по значению. В ряде устройств требуется, чтобы с изменением полярности тока управления I_y изменялась фаза переменного или полярность постоянного тока. Таким свойством обладает реверсивный магнитный усилитель [7]. Он состоит из двух обычных магнитных усилителей, управляемых общим током I_y (рис. 1.9, а). Обмотки смещения ω_{cm} включаются так, что характеристика одного магнитного усилителя $AL1$ смещается в сторону отрицательных значений I_y , а другого $AL2$ — в сторону положительных значений (рис. 1.9, б). При этом в случае $I_y = 0$ наблюдается равенство выходных токов магнитных усилителей $I_{n1} = I_{n2}$. Если нагрузка Z_n включена на разность токов, то с изменением полярности тока управления I_y изменяется фаза (или знак при выпрямленных тока) и тока нагрузки I_n .

если его характеристика расположена справа от оси абсцисс (рис. 1.8, з). При этом в случае отсутствия тока I_y ток в нагрузке близок минимальному значению (точка 5), реле находится в начальном состоянии. Условиею действия реле (см. § 2.2) соответствует скачкообразное изменение тока нагрузки до максимального (точка 3) при токе $I_y \geq I_{д.р}$ действия реле. Реле возвращается в исходное положение (происходит отпущение реле) при

§ 1.5. НАСЫЩАЮЩИЕСЯ ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

В дифференциальной токовой защите (см. § 9.4; 12.2; 13.5) для улучшения ее характеристик при переходных процессах применяются *насыщающиеся трансформаторы тока* (НТТ). На основе НТТ выполняют измерительные реле двух разновидностей: с насыщающимися трансформаторами тока и с магнитным торможением. При внешних коротких замыканиях и при включениях, например, силовых трансформаторов возникает переходный процесс. Как в том, так и в другом случае защита действовать не должна. Однако ток переходного процесса воздействует на дифференциальную защиту. В начальный момент он обычно содержит аперiodическую слагающую. Она и используется для обеспечения недействия защиты, имеющей НТТ.

Насыщающийся трансформатор тока $TLAT$ содержит трехстержневой ферромагнитный сердечник (рис. 1.10, а). Воздействующая величина (ток I_1) поступает в первичную обмотку ω_1 , а к вторичной ω_2 подключается измерительное максимальное реле тока KA . Характеристика $I_p = f(I_1)$ насыщающегося трансформатора зависит от характера изменения тока I_1 (рис. 1.10, б). Если ток i_1

синусоидальный (не смещен относительно оси времени), то магнитная индукция в сердечнике изменяется в широких пределах $-B_{\max} \leq B \leq B_{\max}$. Указанному изменению индукции пропорционально среднее значение ЭДС вторичной обмотки и ток I_p в реле. В этом случае НТТ действует как обычный трансформатор тока.

Апериодическая слагающая изменяет режим работы НТТ, она насыщает его магнитопровод. На рис. 1.10, б показан случай, когда ток $i_{\delta p}$ (бросок тока намагничивания включаемого силового

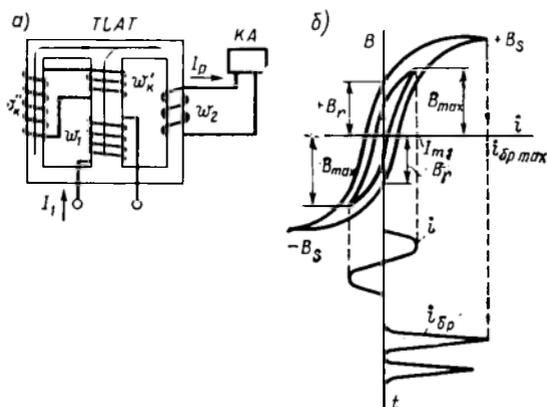


Рис. 1.10. Насыщающийся трансформатор тока (а) и графики мгновенных значений величин (б)

трансформатора) из-за апериодической слагающей полностью смещен относительно оси времени. Прохождение такого тока по обмотке w_1 НТТ сопровождается изменением индукции только в пределах $+B_s \geq B \geq +B_r$. Поэтому среднее значение ЭДС вторичной обмотки и ток в реле получаются намного меньшими, несмотря на то что ток $i_{\delta p, \max} \geq I_{m1}$. Обмотки w_k' и w_k'' предусмотрены для усиления действия апериодической слагающей. Они соединены так, что магнитные потоки левого и среднего стержней складываются. Поэтому часть тока обмотки w_1 попадает в обмотку w_2 путем двойной трансформации. Таким образом, апериодическая слагающая не трансформируется в обмотку w_k' и ухудшает трансформацию периодической слагающей. Ток двойной трансформации поэтому оказывается относительно мал. При отсутствии апериодической слагающей ток двойной трансформации возрастает.

Изменять характеристику НТТ можно также путем изменения степени его намагничивания дополнительным током управления I_y . Для этого предусматривается обмотка управления w_y (рис. 1.11, а). Магнитный поток Φ_y , обусловленный током I_y , замыкается только в крайних стержнях магнитопровода и намагничивает их. Для исключения влияния на работу реле ЭДС, индуцированных этим потоком в секциях вторичной обмотки w_2 , секции включены так,

чтобы ЭДС вычитались. При этом магнитный поток Φ_1 от тока в первичной обмотке индуцирует в этом контуре ЭДС, действующие согласно и обуславливающие ток в обмотке реле. Таким образом, в НТТ существует трансформаторная связь только между

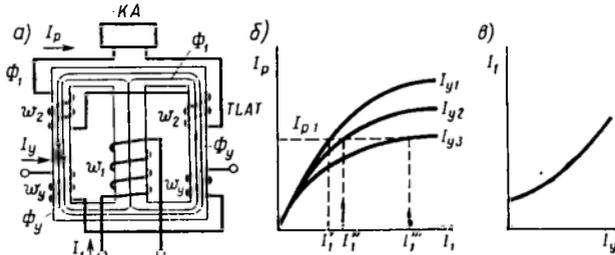


Рис. 1.11. Насыщающийся трансформатор тока с дополнительным подмагничиванием (а) и его характеристики (б, в)

обмотками w_1 и w_2 , зависящая от степени намагничивания магнитопровода, т. е. от тока I_y . С увеличением тока I_y , например от I_{y1} до I_{y3} , степень намагничивания увеличивается и для получения одного и того же вторичного тока I_{p1} необходимо увеличивать ток I_1 (рис. 1.11, б) соответственно от I_1' до I_1''' . Зависимость $I_1 = f(I_y)$ называется *тормозной характеристикой* (рис. 1.11, в), а обмотка управления — *тормозной обмоткой*.

§ 1.6. ФАЗОПОВОРОТНЫЕ И ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫЕ СХЕМЫ

Фазоповоротные схемы. С помощью фазоповоротных схем производят линейные преобразования напряжения (тока) в напряжение (ток). При этом напряжение на выходе схемы смещается по фазе относительно напряжения на ее входе на некоторый угол α . В процессе преобразования может измениться и значение величины.

Одна из фазоповоротных схем показана на рис. 1.12, а. Схема содержит две одинаковые резисторно-конденсаторные цепи, соединенные параллельно, к которым подводится напряжение \underline{U}_1 . Преобразованное напряжение $\underline{U}_2 = ke^{j\alpha} \underline{U}_1$ измеряют между точками в и д.

Электрическая цепь из последовательно соединенных резисторов R_1, R_2 и конденсаторов C_1, C_2 с сопротивлениями R и X_C дает возможность получать напряжения $\underline{U}_R = IR$ и $\underline{U}_C = -jIX_C$, пропорциональные подведенному напряжению \underline{U}_1 , но смещенные относительно него по фазе на некоторые углы в стороны опережения (\underline{U}_R) и отставания (\underline{U}_C), которые определяются соотношением R и X_C , а угол между \underline{U}_R и \underline{U}_C во всех случаях остается равным $\pi/2$. Таким образом, напряжения \underline{U}_1 , \underline{U}_R и \underline{U}_C образуют прямоугольный треуголь-

ник, опирающийся на диаметр окружности — вектор напряжения \underline{U}_1 с вершиной, скользящей по дуге окружности при изменении соотношения R и X_C . На этой основе построена векторная диаграмма фазоповоротной схемы (рис. 1.12, б).

Фазоповоротная схема, преобразующая ток \underline{I}_1 в ток $\underline{I}_2 = ke^{j\alpha} \underline{I}_1'$, показана на рис. 1.12, в. Ее векторная диаграмма (рис. 1.12, г) не требует пояснений. Изменение угла α достигается изменением сопротивления резистора R .

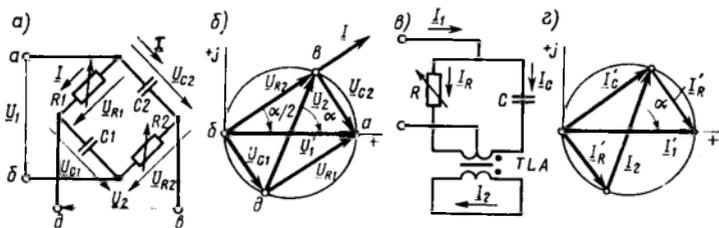


Рис. 1.12. Схемы линейного преобразования напряжения \underline{U}_1 в \underline{U}_2 и тока \underline{I}_1 в \underline{I}_2 , фазоповоротными схемами (а, в), векторные диаграммы (б, г)

В ряде случаев на выходе того или иного элемента необходимо иметь величину вида $\underline{A} = k_1 \underline{U} + k_2 \underline{I}$. Если это ток, то для получения $k_2 \underline{I}$ используют рассмотренную фазоповоротную схему. Преобразовать напряжение в ток $k_1 \underline{U}$ можно путем включения в цепь сопротивления $Z \gg Z_n$. На рис. 1.13, а показана схема, состоящая из двух цепей. На вход одной подается напряжение \underline{U} , а на вход другой — ток \underline{I} . Цепи соединены параллельно, и этим достигается получение в нагрузке \underline{Z}_n суммарного тока $\underline{I}_n = k_1 \underline{U} + k_2 \underline{I}'$. На рис. 1.13, б показана схема для получения величин $\underline{A} = k_1 \underline{U} + k_2 \underline{I}$ и $\underline{B} = k_1 \underline{U} - k_2 \underline{I}$, являющихся напряжениями. При этом напряжение $k_2 \underline{I}$ получено с помощью трансреактора TAV .

Частотно-зависимые схемы. В ряде автоматических устройств используется изменение частоты синусоидального напряжения (тока). Составной частью измерительных органов этих устройств являются так называемые частотно-зависимые схемы. Изменение частоты напряжения (тока) на входе преобразуется ими в изменения амплитуды или фазы напряжения (тока) на выходе.

На рис. 1.14, а показана частотно-зависимая схема, преобразующая изменение частоты в изменения фазы. Ее используют, например, для выполнения измерительного реле частоты РЧ-1.

Схема состоит из частотно-зависимого элемента (цепь $LR, C, R3$) и делителя напряжения (цепь $R1-R2$). На вход схемы подается напряжение \underline{U} с изменяющейся частотой. Ток \underline{I}_R , проходящий по цепи делителя, и напряжение \underline{U}_R ,

совпадают по фазе с напряжением \underline{U} (рис. 1.14, б, в). Фаза тока \underline{I}_{LC} в цепи частотно-зависимого элемента относительно напряжения \underline{U} определяется соотношением сопротивлений X_{LR} и X_C , которые зависят от частоты. При этом ток

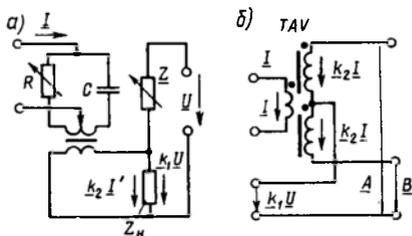


Рис. 1.13. Схема для получения тока (а) и напряжения (б) суммированием составляющих, пропорциональных току и напряжению на входе устройства

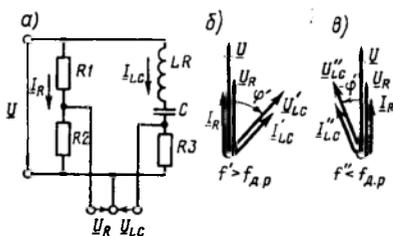


Рис. 1.14. Частотно-зависимая схема (а) и векторные диаграммы (б, в)

\underline{I}_{LC} может опережать, совпадать и отставать по фазе от напряжения \underline{U} . Напряжение \underline{U}_{LC} совпадает по фазе с током \underline{I}_{LC} . Таким образом, изменение частоты напряжения \underline{U} сопровождается изменением угла ϕ сдвига фаз между напряжениями \underline{U}_{LC} и \underline{U}_R . Схема выполнена так, что напряжение \underline{U}'_{LC} отстает от напряжения \underline{U}_R (рис. 1.14, б), если частота f' напряжения \underline{U} больше частоты действия реле ($f' > f_{Д.Р}$), а \underline{U}''_{LC} опережает его (рис. 1.14, в), если $f'' < f_{Д.Р}$.

§ 1.7. ФИЛЬТРЫ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ТОКА И НАПЯЖЕНИЯ

При нарушении симметричного режима трехфазной системы, например вследствие несимметричных коротких замыканий, в полных фазных токах и напряжениях наряду с током \underline{I}_1 и напряжением \underline{U}_1 прямой последовательности появляются составляющие обратной последовательности \underline{I}_2 , \underline{U}_2 и нулевой последовательности \underline{I}_0 , \underline{U}_0 (при коротких замыканиях на землю). Это дает возможность, в частности, выполнить защиту, реагирующую на появление данных составляющих. Для их выделения из полных фазных токов и напряжений используют устройства, называемые *фильтрами симметричных составляющих*.

Фильтр тока обратной последовательности (ФТОП). Первичный ток обратной последовательности определяется выражением [14] $\underline{I}_{2A} = (\underline{I}_A + a^2 \underline{I}_B + a \underline{I}_C) / 3$, где \underline{I}_A , \underline{I}_B и \underline{I}_C — фазные токи соответственно фаз А, В и С; $a = e^{j2\pi/3}$ — оператор фазы.

Таким образом, складывая геометрически вторичный ток \underline{I}_a с повернутыми против часовой стрелки на угол $4\pi/3$ током \underline{I}_b и на угол $2\pi/3$ током \underline{I}_c , из несимметричной системы вторичных фазных токов можно выделить составляющую обратной последовательности

сти. В общем случае при наличии несимметрии в полных фазных токах содержатся все симметричные составляющие, а на выходе фильтра должен появиться только ток обратной последовательности. Для упрощения фильтра к нему подводят токи, уже не содержащие составляющих нулевой последовательности. Если это фазные токи, то из них предварительно исключают ток нулевой последовательности, т. е. фильтр включают на разности токов, например $(\underline{I}_a - \underline{I}_0)$ и $(\underline{I}_c - \underline{I}_0)$. Составляющие нулевой последовательности

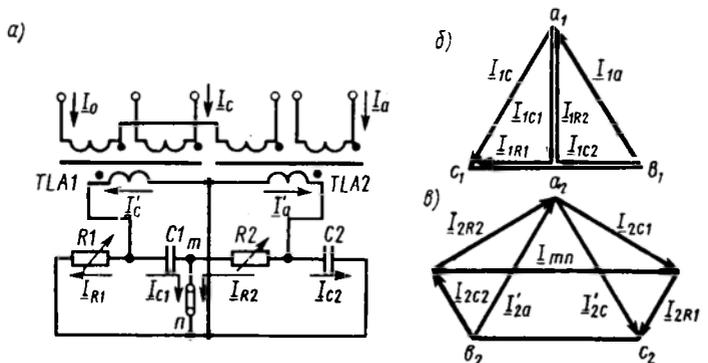


Рис. 1.15. Схема фильтра тока обратной последовательности (а) и векторные диаграммы (б, в)

ности в фазных токах равны по абсолютному значению и совпадают по фазе, поэтому в разностях фазных токов $(\underline{I}_a - \underline{I}_b)$, $(\underline{I}_b - \underline{I}_c)$, $(\underline{I}_c - \underline{I}_a)$ они отсутствуют. В связи с этим фильтры тока обратной последовательности включают и на разности фазных токов. Существует множество различных схем фильтров. Один из них — активно-емкостный фильтр, используемый в устройствах полупроводниковых реле тока обратной последовательности РТФ-8УХЛ4, РТФ-804, предназначенных для защиты электрических установок, и в устройствах полупроводниковых реле тока обратной последовательности РТФ-9УХЛ4, РТФ-904, применяемых для защиты трансформаторов и синхронных генераторов. Фильтр (рис. 1.15, а) состоит из вторичных измерительных трансформаторов тока $TLA1$ и $TLA2$. Первичные обмотки трансформаторов включены на разности токов $(\underline{I}_a - \underline{I}_0)$ и $(\underline{I}_c - \underline{I}_0)$. К вторичным обмоткам трансформаторов подключены резисторно-конденсаторные цепи так, что токи \underline{I}'_a и \underline{I}'_c разветвляются между сопротивлениями резисторов R и конденсаторов C . При этом в цепи mn (выход фильтра) ток $\underline{I}_{mn} = (\underline{I}_{R2} + \underline{I}_{C1})$. Для получения фильтра тока обратной последовательности необходимо сопротивления резисторов $R1, R2$ и конденсаторов X_{C1}, X_{C2} выбрать так, чтобы при отсутствии в полных фаз-

ных токах, а следовательно, и в токах \underline{I}_a' и \underline{I}_c' тока обратной последовательности ток \underline{I}_{mn} отсутствовал.

Этому соответствует векторная диаграмма токов (рис. 1.15, б). Здесь токи прямой последовательности \underline{I}_{1R2} и \underline{I}_{1C1} , проходящие по цепи mn , равны и имеют противоположные направления, поэтому $(\underline{I}_{1R2} + \underline{I}_{1C1}) = 0$. При построении векторной диаграммы заданными являлись векторы токов прямой последовательности \underline{I}'_{1a} и \underline{I}'_{1c} , а определению подлежали их составляющие \underline{I}_{1R2} , \underline{I}_{1C2} и соответственно \underline{I}_{1R1} , \underline{I}_{1C1} , представляющие собой катеты треугольников тока, как и в фазоповоротной схеме (см. рис. 1.12, в, г). Из векторной диаграммы следует

$$I_{1C1}/I_{1R1} = I_{1R2}/I_{1C2} = \sqrt{3}.$$

Так как сопротивления обратно пропорциональны токам, то

$$X_{C1}/RI = R2/X_{C2} = \frac{1}{\sqrt{3}} \quad \text{или} \quad X_{C1} = RI/\sqrt{3} \quad \text{и} \quad R2 = X_{C2}/\sqrt{3}.$$

Для обеспечения равенства токов \underline{I}_{1R2} и \underline{I}_{1C1} по абсолютному значению необходимо, чтобы

$$X_{C1} = R2 = RI/\sqrt{3},$$

при этом $X_{C2} = RI$. Если на вход фильтра подать только токи обратной последовательности, то этому случаю будет соответствовать векторная диаграмма, показанная на рис. 1.15, в. Она отличается от векторной диаграммы токов прямой последовательности тем, что векторы токов \underline{I}'_{2a} и \underline{I}'_{2c} меняются местами. При этом на выходе фильтра в цепи mn появляется значительный ток $\underline{I}_{mn} = (\underline{I}_{2R2} + \underline{I}_{2C1})$. Из рассмотрения векторных диаграмм следует, что если в токах, подводимых к фильтру, содержатся составляющие прямой и обратной последовательностей, то на выходе фильтра появляется ток \underline{I}_{mn} , пропорциональный только току обратной последовательности.

В нормальном режиме и при трехфазных коротких замыканиях к фильтру тока обратной последовательности подводятся токи, содержащие только составляющие прямой последовательности. Поэтому в этих режимах ток в нагрузке фильтра отсутствует. Однако в действительности за счет погрешностей в работе фильтра и наличия некоторой несимметрии подводимых токов в нагрузке фильтра, в частности в обмотке реле, имеется небольшой ток, называемый *током небаланса*.

Рассмотренный фильтр тока обратной последовательности превращается в фильтр тока прямой последовательности, если поменять местами токи на входных зажимах \underline{I}_a и \underline{I}_c (рис. 1.15, а). Распространение получили также *комбинированные фильтры*, которые одновременно выделяют составляющие прямой и обратной последовательностей. Такой фильтр в общем случае можно получить, если расстроить фильтр тока обратной последовательности, изменяя, например, сопротивление резистора $R2$.

Фильтр тока нулевой последовательности. В соответствии с методом симметричных составляющих [14] первичный ток нулевой последовательности $\underline{I}_0 = (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C)/3$.

Токи можно сложить, если вторичные обмотки трансформато-

ров тока, установленных в трех фазах, соединить параллельно одноименными выводами, а к точкам соединения подключить обмотку реле КА (рис. 1.16, а). При этом $\underline{I}_p = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c$.

Для реальных трансформаторов тока с учетом их токов намагничивания и коэффициентов трансформации ток в реле

$$\underline{I}_p = (1/K_I) (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C) - (1/K_I) (\underline{I}_{\text{нам А}} + \underline{I}_{\text{нам В}} + \underline{I}_{\text{нам С}})$$

или

$$\underline{I}_p = 3\underline{I}_0/K_I - \underline{I}_{\text{нб}}. \quad (1.9)$$

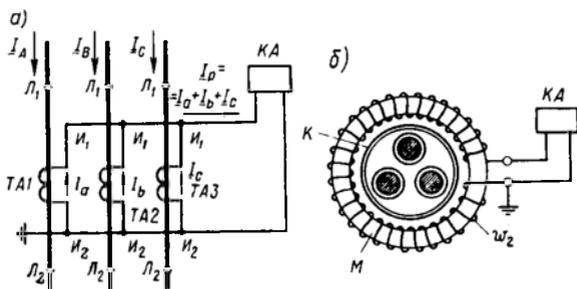


Рис. 1.16. Фильтры тока нулевой последовательности

Ток нулевой последовательности появляется при повреждениях на землю. В других режимах, когда он отсутствует, через реле проходит только ток небаланса $\underline{I}_{\text{нб}} = (\underline{I}_{\text{нам А}} + \underline{I}_{\text{нам В}} + \underline{I}_{\text{нам С}})/K_I$, который увеличивается с возрастанием первичного тока и появлением в нем аperiодической слагающей. Рассмотренная схема соединения трансформаторов тока ТА1—ТА3 называется *трехтрансформаторным первичным фильтром тока нулевой последовательности*. Он используется обычно в защитах элементов сетей с заземленными нейтральными.

Применяется также однитрансформаторный первичный фильтр, представляющий собой специальный измерительный *трансформатор тока нулевой последовательности* (ТНП). Трансформатор (рис. 1.16, б) состоит из тороидального магнитопровода М, на котором располагается вторичная обмотка. Магнитопровод надевается на трехфазный кабель К, который является первичной обмоткой ТНП. Изготавливаются также трансформаторы тока нулевой последовательности с магнитопроводом прямоугольной формы для шинного токопровода.

Первичным током ТНП является сумма фазных токов, проходящих по проводам кабеля или шинам. В нормальном режиме и при многофазных коротких замыканиях сумма фазных токов равна нулю, поэтому магнитный поток в магнитопроводe отсутствует, а ЭДС вторичной обмотки и ток в реле КА тоже равны нулю.

При замыкании на землю эквивалентный первичный ток определяется токами нулевой последовательности. Он обуславливает в магнитопроводе поток, который наводит ЭДС во вторичной обмотке ТНП, возбуждающую ток в реле. Таким образом, ток в обмотке реле появляется только при замыкании на землю; он пропорционален току нулевой последовательности I_0 .

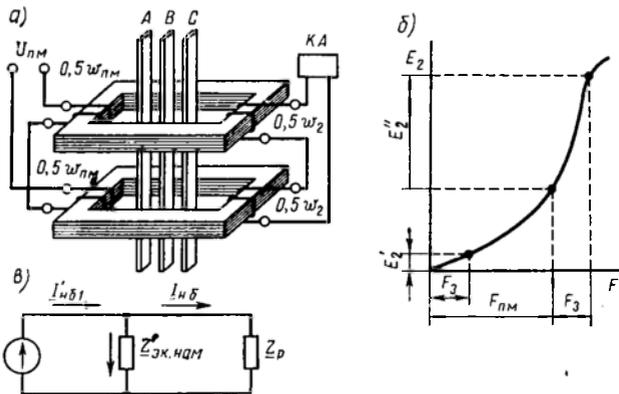


Рис. 1.17. Трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием (а), его характеристика намагничивания (б) и схема замещения (в)

В действительности в ТНП осуществляется суммирование не токов I_A , I_B и I_C , а соответствующих магнитных потоков Φ_A , Φ_B и Φ_C , которые, замыкаясь по магнитопроводу, образуют результирующий поток первичной обмотки $\Phi = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C$. Взаимные индуктивности между проводами фаз защищаемой установки и вторичной обмоткой ТНП не одинаковы, что обуславливает наличие некоторого потока небаланса $\Phi_{нб}$ в магнитопроводе и тока небаланса $I_{нб}$ в обмотке реле при нормальной работе и многофазных коротких замыканиях, не связанных с землей.

Таким образом, существенное отличие ТНП от трехтрансформаторного фильтра состоит в том, что его ток небаланса определяется только несимметрией расположения проводов фаз кабеля относительно магнитопровода и вторичной обмотки. Поэтому он значительно меньше тока небаланса трехтрансформаторного фильтра и обычно не превышает $I_{нб} = 8 \dots 10$ мА. Область применения ТНП определяется защитами от замыкания на землю в системах с изолированной и компенсированной нейтралью.

Для повышения чувствительности защиты трансформатор тока нулевой последовательности выполняют с подмагничиванием (рис. 1.17, а). Сущность подмагничивания состоит в том, что с помощью дополнительной обмотки в ТНП создается вспомогательный магнитный поток, благодаря которому трансформатор работает в оптимальном режиме, отдавая во вторичную цепь наибольшую мощность. Первичная обмотка ТНП состоит из одного витка, поэтому магнитодвижущая сила F_3 , обусловленная первичным током замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью, мала. Из ха-

рактические характеристики намагничивания ТНП (рис. 1.17, б) видно, что при отсутствии подмагничивания МДС F_3 создает во вторичной обмотке ТНП небольшую ЭДС E_2' . При наличии подмагничивания магнитодвижущая сила $F_{\text{пм}}$ перемещает рабочую точку характеристики в область наибольшей крутизны, в результате при той же F_3 ЭДС во вторичной обмотке значительно возрастает до E_2'' . Соответственно увеличивается ток в реле, т. е. повышается чувствительность защиты.

Источником тока подмагничивания служит первичный измерительный трансформатор напряжения. Для исключения трансформаторной связи между обмоткой подмагничивания и вторичной обмоткой магнитопровод ТНП выполняют из двух частей, имеющих самостоятельные секции обмотки подмагничивания $\omega_{\text{пм}}$ и вторичной обмотки ω_2 (рис. 1.17, а). Секции обмотки $\omega_{\text{пм}}$ одна относительно другой включены встречно, а секции обмотки ω_2 — согласна. Поэтому ЭДС, наводимые в секциях вторичной обмотки магнитным потоком подмагничивания, компенсируются, а при отсутствии составляющих нулевой последовательности в первичных токах по обмотке реле проходит только ток небаланса $I_{\text{нб}}$.

В общем случае ток $I_{\text{нб}}$ содержит две составляющие, одна из которых $I_{\text{нб.нс}}$ обусловлена несимметричным расположением первичных токопроводов относительно вторичной обмотки, а вторая $I_{\text{нб.пм}}$ — неидентичностью магнитопроводов ТНП. В паспортных данных ТНП задают соответствующие им ЭДС небаланса $E_{\text{нб.нс}}$ и $E_{\text{нб.пм}}$ при номинальном режиме трансформатора тока $I_{\text{ном}}$ и $U_{\text{пм.ном}}$. Определяя ток небаланса, обе его составляющие складывают арифметически (это соответствует наихудшему случаю — их совпадению по фазе), причем составляющую $I_{\text{нб.нс}}$ находят не для номинального режима ТНП, а для случая внешнего короткого замыкания, когда в первичной цепи проходит ток, в k раз больший номинального:

$$I_{\text{нб}} = kE_{\text{нб.нс}} / |Z_{\text{р}} + Z'_{\text{эк.нам}}| + E_{\text{нб.пм}} / Z_{\text{р}}. \quad (1.10)$$

Здесь $Z_{\text{р}}$ и $Z'_{\text{эк.нам}}$ — соответственно сопротивление обмотки реле и эквивалентное сопротивление ветви намагничивания трансформатора тока, отнесенное к вторичной обмотке (рис. 1.17, в).

При исчезновении намагничивания (например, из-за обрыва в цепи обмотки $\omega_{\text{пм}}$) второе слагаемое в (1.10) равно нулю (так как $E_{\text{нб.пм}} = 0$), но одновременно резко падает сопротивление $Z'_{\text{эк.нам}}$. Поэтому в целом ток $I_{\text{нб}}$ может возрасти. Полагая в (1.10) $E_{\text{нб.пм}} = 0$ и $Z'_{\text{эк.нам}} = 0$, можно получить

$$I_{\text{нб}} = kE_{\text{нб.нс}} / Z_{\text{р}}. \quad (1.11)$$

При определении вторичного тока небаланса расчетным служит большее из двух значений, полученных по (1.10) и (1.11). Первичный ток небаланса $I'_{\text{нб1}}$, приведенный к вторичной обмотке в соответствии с эквивалентной схемой ТНП (рис. 1.17, в), распределяется между сопротивлениями $Z'_{\text{эк.нам}}$ и $Z_{\text{р}}$:

$$I_{\text{нб1}} = I'_{\text{нб1}} \omega_2 / \omega_1 = I_{\text{нб}} (Z'_{\text{эк.нам}} + Z_{\text{р}}) \omega_2 / Z'_{\text{эк.нам}}, \quad (1.12)$$

где $\omega_1 = 1$ — число витков первичной обмотки ТНП.

Трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием используется прежде всего в защитах от замыкания на землю синхронных генераторов.

Фильтр напряжения обратной последовательности (ФНОП). Напряжение обратной последовательности можно выделить с помощью ФНОП. Междофазные напряжения \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} , \underline{U}_{ca} , как известно, не содержат составляющих нулевой последовательности, поэтому для упрощения конструкций фильтра целесообразно включить его не на фазные, а на линейные напряжения. Наиболее распространены фильтры, состоящие из резисторно-конденсаторных цепей, рассмотренных в § 1.6.

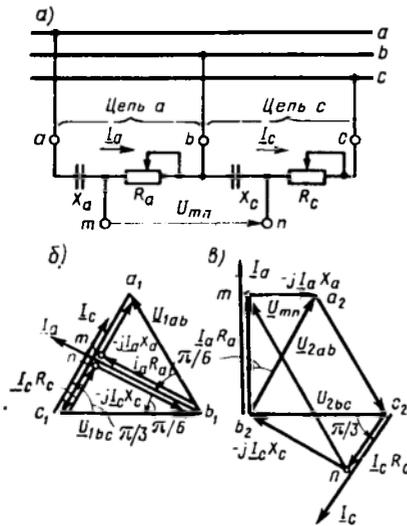


Рис. 1.18. Схема фильтра напряжения обратной последовательности (а) и векторные диаграммы (б, в)

напряжений с учетом принятых направлений токов \underline{I}_a и \underline{I}_c . Из полученных треугольников можно определить соотношения сопротивлений R_a , X_a и R_c , X_c :

$$I_a R_a / (I_a X_a) = 0,5\sqrt{3} / 0,5, \text{ или } R_a = \sqrt{3} X_a;$$

$$I_c R_c / (I_c X_c) = 0,5 / (0,5\sqrt{3}), \text{ или } R_c = X_c / \sqrt{3}.$$

Так как конденсаторы имеют стандартные емкости, то резисторы выполняют с непрерывным изменением их сопротивлений, позволяющим устанавливать их расчетные соотношения. Сопротивления определяются расчетом фильтра исходя из условия отдачи максимальной мощности. Это достигается при равенстве абсолютных значений сопротивления нагрузки фильтра, например реле Z_p , подключаемого к фильтру, и внутреннего сопротивления фильтра $Z_{к.ф}$, замеренного со стороны вторичных зажимов при закороченных первичных.

Векторная диаграмма напряжений обратной последовательности отличается от векторной диаграммы напряжений прямой последовательности тем, что междофазные напряжения \underline{U}_{ab} и \underline{U}_{ca} меняются местами, а вектор напряжения \underline{U}_{bc} поворачивается на угол π (рис. 1.18, в). При этом изменяют положение и тре-

Фильтр содержит две цепи — а и с, включенные соответственно на напряжения \underline{U}_{ab} и \underline{U}_{bc} (рис. 1.18, а). При этом вершине прямоугольного треугольника напряжений в цепи а соответствует точка m, а в цепи с — точка n, являющиеся выходными зажимами фильтра. Сопротивления цепей фильтра X_a , R_a и X_c , R_c подбирают таким образом, чтобы при подводе к фильтру (зажимы а, b, с) междофазных напряжений, не содержащих составляющих обратной последовательности, на его выходных зажимах (между точками m и n) напряжение \underline{U}_{mn} было равно нулю. В этом случае на векторной диаграмме фильтра точки m и n совпадают (рис. 1.18, б).

При построении векторной диаграммы прежде всего изображают векторы подведенных к цепям фильтра напряжений прямой последовательности \underline{U}_{1ab} и \underline{U}_{1bc} . Затем для каждой цепи строят треугольник

угольники напряжений, а их вершины m и n смещаются относительно друг друга. Напряжение \underline{U}_{mn} между точками m и n является напряжением на выходе фильтра в режиме, когда его выходные зажимы разомкнуты. Оно пропорционально подведенному напряжению обратной последовательности. Согласно векторной диаграмме, $\underline{U}_{mn} = 1,5 \underline{U}_{2abc} / \pi^{1/3}$.

В общем случае, когда в подведенных к фильтру напряжениях содержатся составляющие прямой и обратной последовательностей, анализ работы фильтра проводится аналогично. При этом на его разомкнутых выходных зажимах m и n появляется напряжение \underline{U}_{mn} , пропорциональное только напряжению обратной последовательности, т. е. $\underline{U}_{mn} = m_x \underline{U}_2$, где m_x — коэффициент пропорциональности, называемый *отношением холостого хода*.

В нормальном симметричном режиме и при трехфазных коротких замыканиях на выходе фильтра имеется небольшое напряжение *небаланса* $U_{\text{нб}}$, которое определяется погрешностью в работе фильтра и наличием некоторой несимметрии системы входных напряжений. Погрешность в работе фильтра увеличивается при отклонении частоты, так как изменяется сопротивление конденсаторов фильтра и нарушается расчетное соотношение между R и X .

Рассмотренный фильтр можно использовать и как фильтр напряжения прямой последовательности. Для этого достаточно поменять местами входные зажимы фильтра, например a и c . Если в фильтре нарушается указанное соотношение между R и X , то получается комбинированный фильтр, напряжение на выходе которого пропорционально $\underline{U}_1 + k \underline{U}_2$.

§ 1.8. НЕЛИНЕЙНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В устройствах релейной защиты и автоматики систем электропитания используют нелинейные измерительные преобразователи, такие, например, как преобразователи синусоидальных токов и напряжений в постоянные; преобразователи, выделяющие максимальный ток или минимальное напряжение из токов или напряжений аварийного режима. Эти и другие нелинейные преобразователи подробно рассмотрены в [7, 15]. В настоящем параграфе сообщаются лишь краткие сведения, достаточные для изучения последующих разделов учебника.

Преобразователи синусоидальных токов и напряжений в постоянные используют различные схемы выпрямления. Наибольшее распространения получила схема двухполупериодного выпрямления VS (рис. 1.19, a). Основными элементами ее являются вентили — обычно кремниевые диоды $VD1—VD4$. Они включаются так, что при активной нагрузке R_n в первый полупериод открытыми оказываются, например, диоды $VD1—VD3$, а во второй — диоды $VD2—VD4$. При этом на выходе схемы в нагрузке R_n выпрямленный ток и напряжение не постоянны (рис. 1.19, b). Они содержат постоянную составляющую, которая является средним значением выпрямленных величин (показано пунктиром) и переменную составляющую. Постоянные составляющие тока и напряжения

$$I_{\text{ср}} = (2/\pi) I_{\text{max}} = (2\sqrt{2}/\pi) I; \quad U_{\text{ср}} = (2/\pi) U_{\text{max}} = (2\sqrt{2}/\pi) U,$$

где I_{\max} , U_{\max} — максимальные, I и U — действующие значения синусоидальных тока и напряжения.

Переменная составляющая содержит в основном гармоническую двойной частоты. Для правильного функционирования уст-

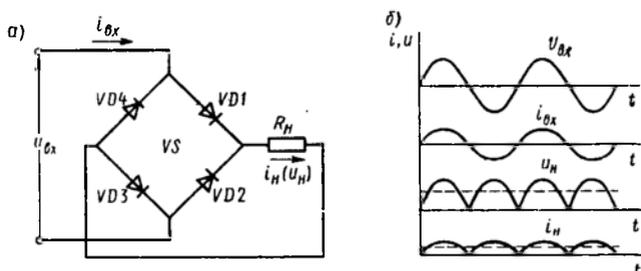


Рис. 1.19. Схема двухполупериодного выпрямления (а) и графики изменения электрических величин во времени при двухполупериодном выпрямлении (б)

ройств релейной защиты и автоматики переменная составляющая обычно нежелательна, поэтому принимают меры по ее уменьшению. В частности, включают конденсатор параллельно нагрузке или реактор последовательно с ней.

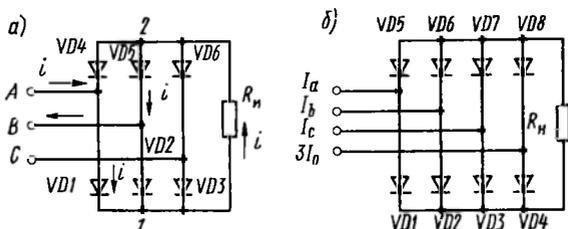


Рис. 1.20. Схемы трехфазного двухполупериодного выпрямления: а — синусоидальных напряжений; б — синусоидальных токов

Схемы трехфазного выпрямителя содержат шесть вентилей (рис. 1.20, а), включенных так, что при подаче на вход схемы синусоидальных напряжений фаз A , B , C потенциал точки 1 равен высшему, а потенциал точки 2 — низшему из потенциалов фаз A , B , C . При этом открытыми оказываются вентиль, связывающий точку 1 с фазой, имеющей высший потенциал, и вентиль, связывающий точку 2 с фазой, имеющей низший потенциал. Если в рассматриваемый момент времени фаза A имеет высший, а фаза B — низший потенциал, то открытыми будут вентили $VD1$ и $VD5$, а путь прохождения тока — таким, как показано на рис. 1.20, а. При

симметричных напряжениях фаз и активной нагрузке среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке $U_{\text{ср}} \approx 2,34U_{\text{ф}}$, где $U_{\text{ф}}$ — действующее значение фазного напряжения [15].

Если на вход схемы подаются синусоидальные токи, сумма которых в каждый момент времени равна нулю, то одновременно оказываются открытыми три вентиля. Через один из них ток проходит в нагрузку, а через два других возвращается, либо через два вентиля проходит в нагрузку, а через один возвращается. Так,

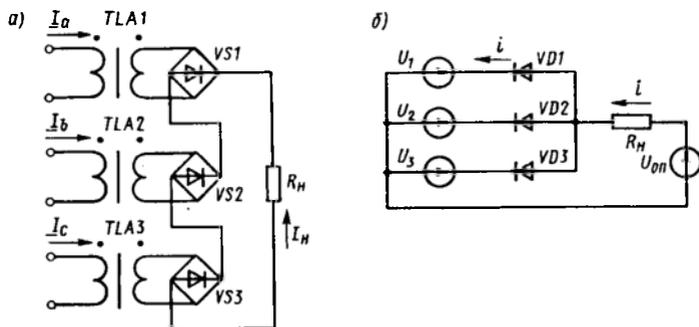


Рис. 1.21. Схемы максиселектора (а) и миниселектора (б)

если ток проходит через вентиль $VD2$, то возвращается через вентили $VD4$ и $VD6$. При симметричных токах среднее значение выпрямленного тока в активной нагрузке $I_{\text{ср}} = 1,35I$ [15]. Если в выпрямляемых токах имеются составляющие нулевой последовательности, то эти составляющие не смогут попасть в нагрузку. Для создания такого пути в схему выпрямления вводят дополнительно два вентиля (рис. 1.20, б).

Максиселекторы и миниселекторы используются для выделения максимального тока или минимального напряжения, которые обычно являются током и напряжением поврежденной фазы (либо поврежденных фаз). Эти устройства позволяют выполнить защиту от всех видов к. з. односистемной, т. е. имеющей только один измерительный орган. Так выполнена, например, максимальная токовая защита устройства ЯРЭ-2201. Для выделения максимального тока использован максиселектор (рис. 1.21, а), имеющий промежуточные трансформаторы тока $TLA1—TLA3$, к вторичным обмоткам которых подключены двухполупериодные выпрямители $VS1—VS3$. Для выделения из подведенных токов I_a , I_b , I_c тока, мгновенное значение которого больше, выходы выпрямителей соединены последовательно и подключены к нагрузке R_H . Наибольший выпрямленный ток соответствующего выпрямителя проходит через нагрузку к двум остальным выпрямителям, открывая все их диоды. При этом два других тока замыкаются через диоды своих

выпрямителей и не выходят во внешнюю цепь. Иногда подводимые к максиселектору токи предварительно преобразуются в напряжения, например, с помощью трансреакторов. При этом для максиселектора может быть использована рассмотренная выше трехфазная двухполупериодная схема выпрямления (рис. 1.20, а). Напряжение на выходе этой схемы пропорционально наибольшему, из подводимых токов. Такой максиселектор применен, например, в дистанционной защите ДЗ-10.

Миниселектор представляет собой устройство, на вход которого подаются выпрямленные напряжения, пропорциональные, например, линейным напряжениям \underline{U}_{ab} , \underline{U}_{bc} , \underline{U}_{ca} , а на выходе всегда выделяется напряжение, пропорциональное наименьшему из подводимых напряжений. Работу миниселектора поясняет схема (рис. 1.21, б), на которой R_n — сопротивление нагрузки, U_1 , U_2 , U_3 — напряжения на входах миниселектора, $U_{оп}$ — опорное напряжение. Пусть выполняется условие $U_1 < U_2 < U_3$. Если при этом $U_1 < U_{оп}$, то диод $VD1$ открывается и под действием напряжения

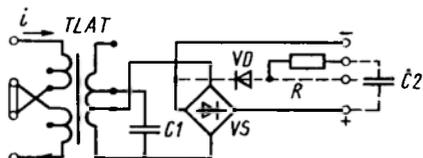


Рис. 1.22. Схема блока питания и заряда типа БПЗ-402

равного разности $(U_{оп} - U_1)$ начинает проходить ток i в направлении, показанном стрелкой. Диоды $VD2$ и $VD3$ продолжают оставаться закрытыми, так как к первому из них прикладывается обратное напряжение, равное разности $(U_2 - U_1)$, а ко второму — напряжение $(U_3 - U_1)$. Если $U_1 > U_{оп}$, то все диоды оказываются закрытыми и ток в нагрузке R_n отсутствует. Таким образом, ток в нагрузке определяется разностью напряжения $U_{оп}$ и наименьшего из напряжений $U_1 - U_3$.

Блоки питания предназначены для обеспечения оперативным выпрямленным током устройств релейной защиты и автоматики. Они обычно подключаются к первичным измерительным трансформаторам тока, напряжения или трансформаторам собственных нужд подстанций. Существует несколько типов блоков питания UGA , подключаемых к трансформаторам тока TA , отличающихся главным образом отдаваемой мощностью. Все они содержат промежуточный насыщающийся трансформатор тока $TLAT$ (рис. 1.22) и двухполупериодный выпрямитель VS на выходе. Использование насыщающегося трансформатора тока необходимо для поддержания достаточно стабильного напряжения на выходе блока питания при изменении тока i в широких пределах. Однако из-за насыщения магнитопровода $TLAT$ резко искажается форма кривой вторичного напряжения, а его амплитуда при значительных нагрузках блока существенно возрастает. В связи с этим принимаются меры по ограничению амплитуды вторичного напряжения до приемлемых значений. Одной из мер стабилизации является

включение параллельно вторичной обмотке $TLAT$ конденсатора CI , обеспечивающего вместе с ветвью намагничивания трансформатора феррорезонансную стабилизацию напряжения на выходе блока [16]. Вторичная обмотка имеет ответвления для подрегулировки тока наступления феррорезонанса и для получения требуемого номинального напряжения. Последовательное и параллельное включение секций первичной обмотки $TLAT$, а также наличие в них ответвлений позволяют изменять входное сопротивление блока и уставки по току наступления феррорезонанса. В устройствах релейной защиты и автоматики в качестве кратковременных источников оперативного тока применяются конденсаторные батареи, заряженные в нормальном режиме работы. Заряжаются конденсаторные батареи с помощью специальных зарядных устройств ($УЗ$). Однако для этой цели можно использовать блоки питания, если к выходу выпрямителя VS подключить диод VD и резистор R (на рис. 1.22 показано пунктиром). Для медленного заряда конденсаторной батареи $C2$ она включается через резистор R . Диод VD исключает ее разряд при исчезновении тока i на входе $TLAT$. Такие блоки получили названия *блоков питания и заряда*. К ним относится блок БПЗ-402. Его мощность не превышает 200 Вт. Блоки питания UGV , подключенные к трансформатору напряжения TV или трансформатору T собственных нужд, содержат промежуточный трансформатор напряжения и выпрямитель. Первичная обмотка промежуточного трансформатора состоит из двух секций, а вторичная имеет ответвления. Соединяя секции параллельно или последовательно, можно блок питания включать на номинальные входные напряжения, например 110 и 220 В соответственно. Ответвления на вторичной обмотке позволяют иметь неизменный уровень выпрямленного напряжения при различных входных напряжениях. Стабилизация вторичного напряжения промежуточного трансформатора предусматривается не всегда. Так, она отсутствует, например, в блоке питания и заряда БПЗ-401. Блоки питания и заряда могут работать в двух режимах: в режиме постоянного питания устройств защиты и автоматики выпрямленным оперативным током или в режиме заряда конденсаторных батарей, используемых в качестве кратковременных источников оперативного тока для приведения в действие коммутационных аппаратов и устройств защиты и автоматики. В режиме заряда к блокам питания и заряда можно подключить и нагрузку небольшой мощности. На рис. 1.23 показаны схемы подключения блоков питания и заряда UGA типа БПЗ-402 к измерительным трансформаторам тока TA и UGV типа БПЗ-401 — к трансформаторам напряжения TV или к трансформаторам собственных нужд T . Включение токовых цепей релейной защиты и автоматики на трансформаторы тока, используемые для питания блоков питания UGA , не допускается. Блоки UGA и UGV можно использовать как отдельно (рис. 1.23, а, б), так и совместно (рис. 1.23, в, г, д). Промышлен-

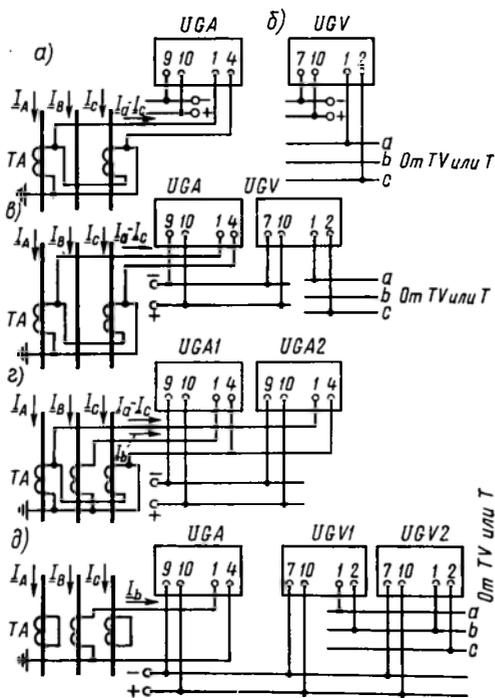


Рис. 1.23. Схемы включения блоков питания и заряда

ность выпускает также блоки питания серии БПТ-11 и БПН-11. Основная область их применения — элементы системы электроснабжения, имеющие выключатели с легкими приводами, где они могут обеспечить питание электромагнита отключения с номинальной мощностью 20—25 Вт, а также питание устройств защиты и сигнализации однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. Выпускаются также мощные блоки питания БПТ-1002 и БПН-2002, предназначенные для питания выпрямленным оперативным током аппаратуры релейной защиты, сигнализации и управления, выполненной на номинальное напряжение 110 или 220 В, имеющие номинальную мощность 800—1500 Вт в кратковременном режиме.

Глава 2

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 2.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

На основе электромеханических элементов создавались устройства релейной защиты и автоматики первого поколения. Начиная с 60-х годов электромеханическая элементная база стала заменяться полупроводниковой. Однако и сейчас релейная защита и автоматика систем электроснабжения наряду с полупроводниковыми используют электромеханические реле: электромагнитные, индукционные, магнитоэлектрические. По назначению они делятся на измерительные и логические. Под электромеханическим реле, согласно ГОСТ 16022—83, понимают электрическое реле, работа которого основана на использовании относительного перемещения его механических эле-

ментов под воздействием электрического тока, протекающего по его обмотке.

На основе электромеханических систем можно создать измерительные реле с одной воздействующей величиной и более, реагирующие элементы схем сравнения, а также реле для логической части автоматических устройств. Широко применяются электромагнитные и индукционные измерительные реле, причем в первом случае осуществляется сравнение величин по абсолютному значению, а во втором — их сравнение по фазе. Реле логической части (промежуточные и реле времени) обычно являются электромагнитными. Магнитоэлектрические и поляризованные реле (электромагнитные реле со вспомогательным поляризующим магнитным полем) используют в качестве реагирующих элементов схем сравнения.

§ 2.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ РЕЛЕ

Для построения электромагнитных реле обычно используют следующие электромеханические системы: с втягивающимся якорем (рис. 2.1, а); с поворотным якорем (рис. 2.1, б); с поперечным движением якоря (рис. 2.1, в). Действие таких реле основано на

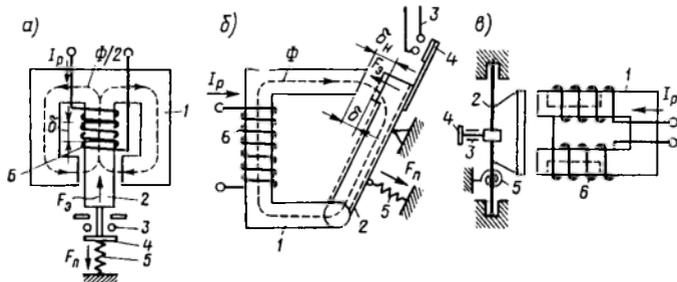


Рис. 2.1. Электромагнитные системы реле

притяжении стального подвижного якоря 2 к электромагниту 1, по обмотке которого проходит ток I_p . Реле косвенного действия имеет контактную систему, которая состоит из неподвижной 3 и подвижной 4 частей. Подвижная часть связана с якорем реле. При отсутствии тока в обмотке 6 якорь удерживается в исходном положении противодействующей пружиной 5 с усилием F_n ; при этом контакт реле разомкнут (замкнут).

При прохождении по обмотке реле тока возникает магнитный поток Φ , замыкающийся через магнитопровод электромагнита, воздушный зазор и якорь. При этом создается электромагнитная

сила $F_{э}$, стремящаяся притянуть якорь реле к электромагниту — обусловить *действие реле*:

$$F_{э} = 0,5 I_p^2 \omega_p^2 (d\lambda/dl), \quad (2.1)$$

где λ — магнитная проводимость; l — длина силовой магнитной линии, м; ω_p — число витков обмотки реле.

Выражение (2.1) является общим для всех конструкций электромагнитных реле. У реле с поворотным якорем магнитное поле в воздушном зазоре практически можно считать равномерным. При этом магнитную проводимость, которую в основном определяют длиной воздушного зазора δ и площадью его сечения S , с достаточной точностью можно принять равной $4\pi S/\delta$. Так как при движении якоря сокращается зазор, то $d\lambda = -d\delta$, при этом

$$d\lambda/(d\delta) = -d\lambda/d\delta = 4\pi S/\delta^2. \quad (2.2)$$

Подставляя (2.2) в выражение (2.1), можно найти

$$F_{э} = 2\pi S \omega_p^2 I_p^2 / \delta^2 = k I_p^2 / \delta^2. \quad (2.3)$$

Для действия реле необходимо, чтобы на всем пути перемещения якоря от начального положения (зазор δ_n) в конечное положение (зазор δ_k) выполнялось условие

$$F_{э,д} > F_{п} + F_{т} = F_{м,д}, \quad (2.4)$$

где $F_{т}$ — сила трения, Н.

Минимальное значение тока I_p , при котором соблюдается условие (2.4), является *током действия реле $I_{д,р}$* . Отпускание якоря, т. е. возврат реле в начальное состояние, может произойти, если на всем пути от δ_k до δ_n сохраняется условие $F_{э,о} < F_{п} - F_{т} = F_{м,о}$.

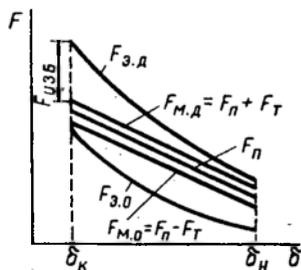


Рис. 2.2. Характеристики электромагнитного реле

На рис. 2.2 изображены совмещенно механические характеристики реле с поворотным якорем с учетом сил трения при действии ($F_{м,д}$) и при отпускании ($F_{м,о}$) и соответственно электромагнитные характеристики ($F_{э,д}$ и $F_{э,о}$), построенные для тока действия $I_{д,р}$ и тока отпускания $I_{о,р}$ — максимального тока в обмотке реле, при котором оно переходит в начальное состояние.

Отношение тока отпускания к току действия характеризуется *коэффициентом отпускания*

$$k_0 = I_{о,р} / I_{д,р}. \quad (2.5)$$

Исходя из требований чувствительности измерительных органов желательно иметь $k_0 \approx 1$.

Электромагнитные характеристики (рис. 2.2) построены при условии, что ток I_p при перемещении якоря и уменьшении зазора δ , несмотря на возрастание индуктивного сопротивления обмотки реле, остается неизменным. Это справедливо для реле тока, у которых ток не зависит от параметров электромагнита, а определяется источником тока, каковым является измерительный трансформатор тока. Если обмотка реле подключается к измерительному трансформатору напряжения, являющемуся источником ЭДС, то вместе с изменением индуктивного сопротивления обмотки изменяется и ток I_p , а электромагнитная сила F_s остается практически неизменной, так как изменение зазора δ компенсируется соответствующим изменением тока. Действие реле (притягивания якоря) не осуществляется, поэтому обмотка реле напряжения выполняется с преобладанием активного сопротивления или последовательно с обмоткой включается резистор с относительно большим сопротивлением. При этом ток в обмотке реле при движении якоря практически не изменяется, а электромагнитная сила возрастает и действие реле обеспечивается.

В качестве измерительных реле обычно применяются *максимальные реле* тока и напряжения и *минимальные реле* напряжения. Действие или отпускание реле, при котором оно выполняет предназначенные ему функции в автоматическом устройстве, называется *срабатыванием реле*. Максимальные реле выполняют свои функции при возрастании тока или напряжения. Поэтому их срабатывание совпадает с действием и ток или напряжение действия соответственно называют *током* $I_{с.р}$ или *напряжением* $U_{с.р}$ *срабатывания реле*. Ток и напряжение отпускания называют *током* $I_{в.р}$ и *напряжением* $U_{в.р}$ *возврата реле*, а коэффициент отпускания (2.5) — *коэффициентом возврата* k_v . Всегда $k_v < 1$. Минимальное реле напряжения выполняет свою функцию в автоматическом устройстве при снижении напряжения, поэтому его срабатывание совпадает с отпусканием. Напряжение срабатывания минимального реле равно напряжению отпускания, а напряжение возврата равно напряжению действия. Поэтому значение коэффициента возврата минимального реле напряжения равно обратному значению коэффициента возврата максимального реле и всегда больше единицы.

После притягивания якоря реле к электромагниту в связи с различным характером изменения электромагнитной и механической характеристик на подвижную часть реле действует избыточная сила $F_{изб}$. Значение k_v тем существеннее отличается от единицы, чем больше избыточная сила. С другой стороны, с ростом избыточной силы повышается надежность работы замыкающих контактов реле. Поэтому избыточная сила должна быть достаточной для надежной работы контактов, но не слишком большой, чтобы не влиять на коэффициент возврата. Эти условия удовлетворяются при использовании П-образной магнитной системы с попереч-

ным движением якоря (см. рис. 2.1, в). На ее основе отечественной промышленностью выпускаются измерительные реле тока и реле напряжения.

Из (2.3) следует, что электромагнитный принцип можно использовать для выполнения реле постоянного и реле переменного тока, так как мгновенное значение электромагнитной силы $F_{эi}$ пропорционально квадрату тока и, следовательно, не зависит от его знака. При линейной зависимости между потоком Φ и током I_p значение $F_{эi}$ пропорционально квадрату мгновенного значения

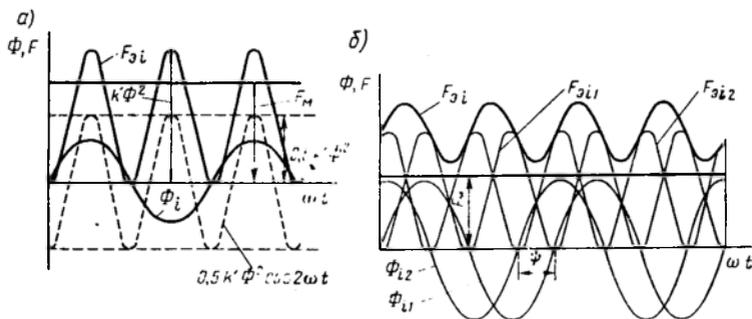


Рис. 2.3. Зависимость мгновенных значений магнитного потока, электромагнитной и противодействующей сил от времени для электромагнитного реле переменного тока с одним (а) и двумя (б) магнитными потоками, смещенными по фазе

потока Φ_i , т. е. $F_{эi} = k'\Phi_i^2$. Для синусоидального тока

$$\Phi_i = \Phi_m \sin \omega t \text{ и } F_{эi} = k' (\Phi_m \sin \omega t)^2. \quad (2.6)$$

С учетом того, что $\sin^2 \omega t = 0,5(1 - \cos 2\omega t)$, получается

$$F_{эi} = 0,5k'\Phi^2 - 0,5k'\Phi^2 \cos 2\omega t. \quad (2.7)$$

Таким образом, мгновенное значение электромагнитной силы состоит из постоянной и переменной составляющих (рис. 2.3, а). В результате их сложения получается электромагнитная сила $F_{эi}$, изменяющаяся во времени с двойной частотой. При этом в некоторые моменты времени она становится меньше противодействующей силы F_m , что вызывает вибрацию якоря. Для устранения вибрации необходимо, чтобы результирующая электромагнитная сила $F_{эi}$ при изменении тока во времени оставалась все время больше противодействующей силы F_m . Этого можно достичь, например, при наличии двух электромагнитных сил $F_{эi1}$ и $F_{эi2}$, смещенных друг относительно друга по фазе (рис. 2.3, б). Результирующая электромагнитная сила $F_{эi}$, равная их сумме, изменяется во времени незначительно, оставаясь все время больше противодействующей силы F_m .

Для получения двух электромагнитных сил необходимо иметь два магнитных потока Φ_{i1} и Φ_{i2} , смещенных во времени. Обычно

это достигается разделением потока в воздушном зазоре на два потока с помощью короткозамкнутого витка (рис. 2.4, а). При этом магнитный поток Φ_1 отстает от потока Φ_2 на угол ψ (рис. 2.4, б).

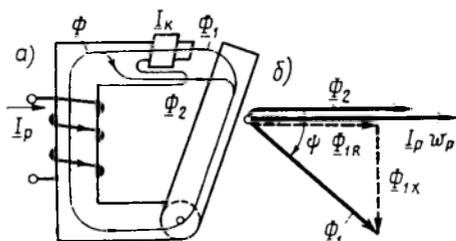


Рис. 2.4. Электромагнитное реле с двумя магнитными потоками (а) и векторная диаграмма (б)

Для выполнения измерительного органа с двумя электрическими величинами можно использовать так называемую балансную электромагнитную систему с двумя катушками и подвижным якорем в виде коромысла. Эта система производит сравнение квадратов абсолютных значений токов I_1 и I_2 . На подвижную систему действуют в противоположные стороны электромагнитные силы

$$F_{\text{с}1} = k_1 I_1^2 / \delta_1^2 \quad \text{и} \quad F_{\text{с}2} = k_2 I_2^2 / \delta_2^2. \quad (2.8)$$

Реле срабатывает, если $F_{\text{с}1} > F_{\text{с}2}$. В комплексной плоскости \underline{W} граничная линия определяется условием $\underline{W} = F_{\text{с}1} / F_{\text{с}2} = 1$ и имеет вид окружности. Зона действия реле располагается вне окружности (см. рис. В.7, а).

Для релейной защиты и автоматики важными параметрами являются время срабатывания и время возврата реле, под которыми понимают время от момента, когда входная воздействующая величина принимает в заданных условиях определенное значение, до момента, когда реле завершает срабатывание или возврат. У электромагнитных реле время срабатывания складывается из двух составляющих:

$$t_{\text{с.р}} = t_{\text{н}} + t_{\text{д}}, \quad (2.9)$$

где $t_{\text{н}}$ — время от момента достижения воздействующей величиной значения срабатывания до момента начала движения якоря, с; $t_{\text{д}}$ — время от начала движения якоря до момента завершения срабатывания реле, с.

Время $t_{\text{н}}$ зависит от скорости нарастания тока в обмотке реле, а время $t_{\text{д}}$ — от хода якоря и скорости его перемещения. У обычных электромагнитных реле без специальных дополнительных устройств время срабатывания составляет $t_{\text{с.р}} = 0,02 \dots 0,1$ с.

Для релейной защиты и автоматики требуются также реле, замыкающие или размыкающие контакты с некоторым замедлением, у промежуточных реле это замедление обычно получают за счет увеличения времени $t_{\text{н}}$, а у реле времени — за счет увеличения времени $t_{\text{д}}$. Для увеличения времени $t_{\text{н}}$, а следовательно, и времени срабатывания реле необходимо замедлить нарастание магнитного потока при включении.

Замедления нарастания магнитного потока в реле можно достичь с помощью медной втулки, располагаемой концентрически с основной обмоткой на общем магнитопроводе. При этом удается получить время срабатывания реле около $t_{с.р.} = 0,1 \dots 0,5$ с. Применение медной втулки для замедления возврата реле более эффективно в связи с тем, что магнитный поток затухает при малом воздушном зазоре, т. е. при большой индуктивности цепи обмотки реле. Время возврата реле удается получить около нескольких секунд. Реле с медной втулкой получили название *реле с магнитным демпфированием*. Они используются в цепях постоянного тока и при включении их через выпрямители могут быть применены в схемах переменного тока.

Реле времени, у которых выдержка времени создается путем увеличения составляющей $t_{д.}$, называются *реле с механическим демпфированием*. Их можно разделить на две группы: реле с замедленным движением якоря и реле с часовым механизмом. Реле с замедленным движением якоря обычно имеют зависимую характеристику выдержки времени. Для получения замедленного движения якоря в конструкциях реле применяют, как правило, жидкостные или воздушные демпферы и используют торможение вихревыми токами. С помощью часового механизма выполняют реле как с независимой, так и с ограниченно зависимой характеристикой выдержки времени.

§ 2.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

Электромагнитные измерительные реле, как и другие (см. § В.3), в зависимости от их включения в защищаемую цепь делятся на первичные и вторичные. По способу воздействия на выключатель защищаемого объекта различаются измерительные реле прямого и косвенного действия.

Первичные реле прямого действия. Эти реле подключаются непосредственно к главной электрической цепи и непосредственно воздействуют на механическое исполнительное устройство выключателя. В связи с этим они не требуют ни первичных измерительных преобразователей, ни источников оперативного тока. В системах электроснабжения первичные реле прямого действия применяются сравнительно редко. Исключение составляют электроустановки постоянного тока, в частности тяговые сети электрифицированного транспорта. Что касается систем переменного тока, то здесь еще можно встретить такие реле, называемые расцепителями. Они являются составной частью автоматического выключателя АВМ-10, используемого в электроустановках напряжением до 1 кВ.

Для выполнения защиты, надежно и селективно действующей при коротком замыкании и перегрузках, максимальные расцепи-

тели снабжают элементами выдержки времени в виде часовых механизмов.

При этом обеспечиваются необходимая выдержка времени срабатывания расцепителя при малых токах и мгновенное отключение автоматического выключателя при больших токах. Такой максимальный расцепитель имеет две уставки тока срабатывания: *замедленного срабатывания* и *мгновенного срабатывания*. В ряде случаев такой расцепитель не обеспечивает селективного действия при коротких замыканиях. Для получения селективного действия не только при перегрузках, но и при всех допустимых для данных автоматических выключателей токах к.з. возникает необходимость ввести некоторос небольшое замедление в действие максимального расцепителя при коротком замыкании. Автоматические выключатели с такими расцепителями называют *селективными*.

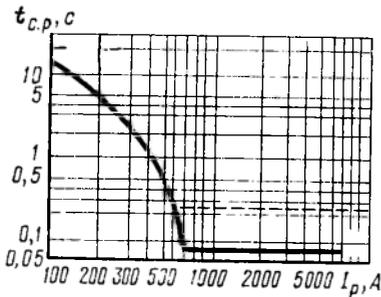


Рис. 2.5. Характеристика максимального расцепителя автоматического выключателя АВМ-10

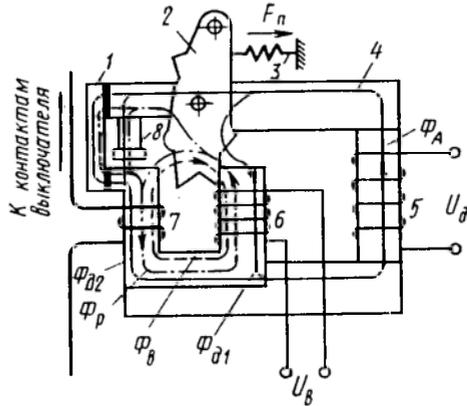


Рис. 2.6. Конструктивная схема магнитной системы быстродействующего поляризованного выключателя типа АВ

На рис. 2.5 дана характеристика выдержки времени максимального расцепителя АВМ. При наличии замедлителя расцепления выдержка времени в независимой части может устанавливаться в пределах $t_{с.р} = 0,25 \dots 0,4$ или $t_{с.р} = 0,4 \dots 0,6$ с.

Таким образом, с помощью максимальных расцепителей в установках напряжением до 1 кВ можно выполнить двухступенчатую токовую защиту: максимальную токовую защиту и токовую отсечку без выдержки или с выдержкой времени.

В системах постоянного тока, например на тяговых подстанциях и постах секционирования тяговой сети, в качестве коммутационных аппаратов используются быстродействующие поляризованные автоматические выключатели АБ2/3, АБ2/4, ВАБ-2 и др. [5, 6]. Они конструктивно выполнены так, что сами без специальных расцепителей выполняют и функции защиты, т. е. являются коммутационным аппаратом и первичным реле прямого действия одновременно. Конструктивная схема магнитной системы выключателя показана на рис. 2.6. Она состоит из сложного магнитопровода 4, подвижного якоря 2 и обмоток 5, 6 и 7. С якорем связаны главные контакты выключателя (на рис. 2.6 не показаны), обмотка 7 включается непосредственно в главную цепь защищаемого элемента. Поэтому ток в обмотке определяется режимом работы электроустановки. Он создает магнитный поток Φ_p , замыкающийся через полюсы магнитопровода. Обмотка 6 является включающей. Оперативное напряжение U_B подводится к ней кратковременно только в момент включения выключателя. Во вклю-

ченном положении выключатель удерживается за счет магнитного потока $\Phi_{д1}$, являющегося частью магнитного потока $\Phi_{д}$, создаваемого током в держащей обмотке 5. Вторая часть $\Phi_{д2}$ этого потока замыкается через левый полюс магнитопровода. Обмотки 5 и 7 включены так, что магнитные потоки Φ_p и $\Phi_{д1}$ в правом полюсе направлены противоположно, а магнитные потоки Φ_p и $\Phi_{д2}$ в левом полюсе направлены согласно (рис. 2.6). В зависимости от соотношения результирующих магнитных потоков в полюсах якорь 2 может быть притянутым к одному или другому полюсу. В нормальном режиме работы, когда ток в обмотке 7 является током нагрузки, результирующий магнитный поток в правом полюсе превосходит результирующий магнитный поток в левом полюсе. Поэтому якорь 2 после включения выключателя остается притянутым к правому полюсу, удерживая контакты замкнутыми (рис. 2.6). При к. з. ток в защищаемом элементе, а следовательно, и в обмотке 7 резко возрастает. В связи с этим результирующий магнитный поток в правом полюсе уменьшается, а в левом полюсе увеличивается и якорь 2 притягивается к левому полюсу, отключая выключатель. Этому способствует также пружина 3. Полное время отключения, включения и время гашения дуги, составляет не более 0,08 с. При изменении направления тока в обмотке 7 изменит направление магнитный поток Φ_p и начнет действовать согласно с магнитным потоком $\Phi_{д1}$.

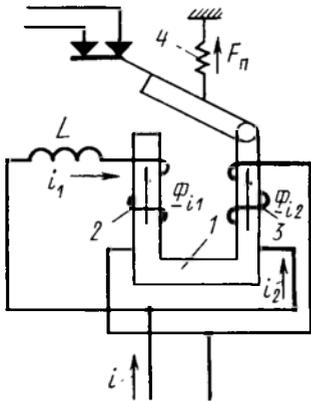


Рис. 2.7. Конструктивная схема магнитной системы реле РДШ

правленной защиты. Ток срабатывания зависит от величины воздушного зазора между левым полюсом и винтом 8 и регулируется этим винтом. На ток срабатывания оказывает влияние также магнитный шунт 1. Обычно параллельно обмотке 7 подключают индуктивный шунт. Ток между ними распределяется обратно пропорционально их сопротивлениям. При плавном изменении тока, что имеет место в нормальном режиме работы, сопротивление шунта практически не меняется. Оно увеличивается за счет индуктивной составляющей при бросках тока к. з. При этом доля тока в обмотке 7 резко возрастает и тем самым повышается чувствительность к коротким замыканиям. Таким образом, при наличии индуктивного шунта выключатель реагирует не только на значение и направление тока, но и на скорость его изменения. Выпускаются и находятся в эксплуатации также неполяризованные выключатели. Они выполняют только функции коммутационного аппарата.

Первичные реле косвенного действия. В системах электроснабжения эти реле применяются относительно редко. Они, в частности, используются в защите тяговой сети постоянного тока вместе с неполяризованными быстродействующими выключателями. При срабатывании контакты реле размыкают цепь держательной катушки 5 (см. рис. 2.6) и выключатель отключается. Распространение получило электромагнитное реле РДШ (реле-дифференциальный шунт) [5, 6]. Оно использует электромеханическую систему с поворотным якорем (рис. 2.7). На полюсах магнитопровода расположены обмотки 2 и 3. Одна из них (обмотка 2) выполнена токопроводом меньшего сечения, обладающим индуктивностью L благодаря надетым на него пакетам трансформаторной стали. Обмотки соединены параллельно так, что токи i_1 и i_2 наводят в магнитопроводе потоки Φ_{i1} и Φ_{i2} , направленные противоположно. В нормальном режиме результирующий магнитный поток $\Phi = \Phi_{i1} - \Phi_{i2}$ оказывается недостаточным для притяжения якоря. Этому препятствует пружина 4. В тяговых сетях ток к. з. и

максимальный ток перегрузки обычно соизмеримы. Однако характер их изменения различен. Действительно, в нормальном режиме ток i в сети изменяется плавно, при этом его составляющие i_1 и i_2 в параллельных ветвях реле определяются лишь омическими сопротивлениями этих ветвей. Иная картина наблюдается при повреждениях. В связи с быстрым изменением тока к. з. в сети i полное сопротивление ветви с индуктивностью L резко возрастает, а ток в этой ветви i_1 становится значительно меньше тока i_2 . При этом чувствительность реле, как и быстродействующего выключателя с шунтом, повышается. Таким образом, даже при соизмеримости тока к. з. и тока нагрузки можно выполнить защиту, чувствительную к токам повреждения.

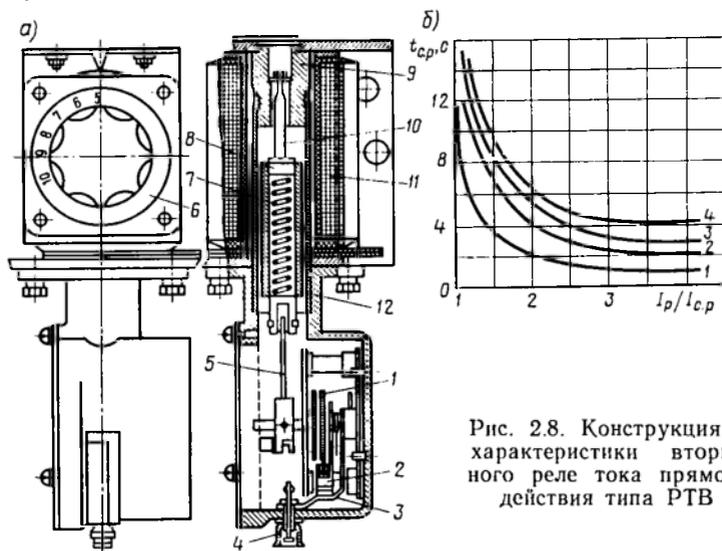


Рис. 2.8. Конструкция и характеристики вторичного реле тока прямого действия типа РТВ

Вторичные реле тока и напряжения прямого действия. Отечественная промышленность выпускает различные модификации вторичных реле тока КА (типов РТМ, РТВ) и реле напряжения КВ (типа РН, РНВ) прямого действия с втягивающимся якорем. Они различаются некоторыми конструктивными деталями и параметрами. Реле устанавливаются непосредственно в пружинные и грузовые приводы выключателей, например ППМ-10, ПП-67, ПРБА. Их обмотки включаются в цепь через первичные измерительные преобразователи. Это дает возможность расширить область использования реле и частично исключить недостатки, присущие первичным реле.

С помощью вторичных реле прямого действия можно выполнять защиты в установках напряжением до 35 кВ.

Максимальное реле тока с ограниченой зависимой выдержкой времени типа РТВ показано на рис. 2.8, а. Выдержка времени создается с помощью часового механизма 1 и может устанавливаться в независимой части в пределах до $t_{c.p} = 4$ с рычагом 2, который с помощью пластины 3 связан с установочным винтом 4. Выдержка времени в зависимой ча-

сти характеристики (рис. 2.8, б) определяется уставкой реле в независимой части. Для установки тока срабатывания обмотка реле 11 имеет ответвления, выведенные на переключатель 6.

Подвижная система реле состоит из сердечника 12 и ударника 10. Ударник жестко связан с часовым механизмом тягой 5. Связь сердечника с ударником, а следовательно, и с часовым механизмом осуществляется пружиной 7, которая одним концом соединена с сердечником, а другим упирается в стопорное кольцо 8 ударника. В зависимости от тока в обмотке реле эта связь может быть жесткой или гибкой.

При прохождении по обмотке реле тока, равного или превышающего ток срабатывания, сердечник 12 стремится притянуться к неподвижному полюсу 9, увлекая за собой ударник. При токах, меньших трехкратного тока срабатывания, электромагнитная сила, действующая на сердечник, оказывается меньше противодействующей силы пружины; пружина не сжимается и действует как жесткая связь. При этом скорости перемещения сердечника и ударника одинаковы и определяются электромагнитной силой и часовым механизмом, поэтому с увеличением тока выдержка времени реле уменьшается, образуя зависимую часть характеристики.

При токах, больших трехкратного тока срабатывания, сердечник мгновенно притягивается к неподвижному полюсу и сжимает пружину. При этом скорость движения ударника вверх не зависит от электромагнитной силы и определяется только часовым механизмом. Реле работает в независимой части характеристики.

По заводским данным, реле РТВ имеет погрешность в выдержке времени $\Delta t_{с.р} = \pm 0,3$ с при работе в независимой части характеристики, которая возрастает в два-три раза при работе реле в зависимой части характеристики и при токе срабатывания достигает нескольких секунд. Реле РТВ имеет сравнительно низкий коэффициент возврата, изменяющийся в зависимости от положения сердечника в пределах $0,4 \leq k_v \leq 0,8$. В расчетах рекомендуется принимать $k_v = 0,65$.

Максимальное реле тока мгновенного действия типа РТМ конструктивно отличается от реле РТВ тем, что не имеет часового механизма. Реле изготавливают на различные токи срабатывания. Например, реле, встроенное в привод выключателя типа ПРБА, позволяет установить ток срабатывания $I_{с.р} = 5 \dots 15$ А. Время срабатывания реле РТМ зависит от кратности тока. При кратностях около 2—3 время срабатывания не превышает $t_{с.р} \leq 0,02$ с.

Следует отметить, что как реле РТВ, так и реле РТМ имеют сложную систему установки тока срабатывания. Переключатель витков сложен по своей конструкции и мало надежен в эксплуатации. В связи с этим созданы реле РТМ с обмотками без ответвлений. При этом установка тока срабатывания осуществляется путем аксального перемещения сердечника специальным винтом. Конструкция реле РТМ Рижского опытного завода Латвэнерго использует оба способа установки тока срабатывания. Благодаря этому, несмотря на расширенные пределы установки тока срабатывания до $I_{с.р} \leq 260$ А, максимальная потребляемая мощность не превышает $P_{с.р} = 600$ В·А. Тем не менее и данная конструкция не может считаться удовлетворительной, так как большинство трансформаторов тока не обеспечивают такой большой мощности.

Таким образом, конструкция реле РТВ и РТМ нуждается в улучшении. Желательным является снижение погрешностей реле, уменьшение их потребления и расширение шкалы тока и времени.

Минимальное реле напряжения с ограниченной зависимой выдержкой времени типа РНВ, как и реле РТВ, имеет часовой механизм. В нормальном режиме, когда к обмотке реле подводится номинальное напряжение, реле находится в заведенном положении. Его сердечник притянут. При снижении напряжения до $U_p < 0,65 U_{ном}$ сердечник под действием собственного веса начинает опускаться с некоторой выдержкой времени. Его быстрому падению препятствует часовой механизм.

Выдержка времени устанавливается, как и у реле типа РТВ, в пределах $0 \leq t_{c.p} \leq 4$ с. Она позволяет отстраивать защиту от кратковременных снижений напряжения. Однако реле имеет устойчивую выдержку времени лишь при напряжении $U_p < 0,35 U_{ном}$. Недостатками реле являются также отсутствие устройства установки напряжения срабатывания и сравнительно большая потребляемая мощность ($P_{c.p} \approx 30 \text{ В} \cdot \text{А}$).

Минимальное реле напряжения мгновенного действия РН не имеет часового механизма, поэтому при срабатывании реле его сердечник перемещается без замедления. У реле РН напряжения срабатывания и возврата не могут изменяться и находятся в пределах $U_{c.p} = (0,35 \dots 0,65) U_{ном}$ и $U_{в.p} = (0,65 \dots 0,85) U_{ном}$.

Вторичные реле тока и напряжения косвенного действия получили большое распространение благодаря следующим достоинствам: эти реле изготавливают для включения в цепь через первичные измерительные преобразователи, поэтому их параметры не зависят от параметров защищаемого элемента, при этом они могут быть выполнены достаточно чувствительными с незначительными погрешностями и относительно малым потреблением мощности при срабатывании; их можно настраивать без отключения элемента системы электроснабжения; реле можно устанавливать в любом удобном для работы и эксплуатации устройства месте; они позволяют создать логическую часть схемы и выполнить в случае необходимости релейную защиту и автоматику любой сложности.

Вместе с тем эти реле имеют недостатки, присущие электро-механическим системам: значительные потребляемые мощности, сравнительно большие размеры, недостаточная надежность из-за наличия подвижной системы и контактов. Кроме того, реле можно использовать только при наличии источников оперативного тока.

Реле тока РТ-40 используют П-образную магнитную систему с поперечным движением якоря (рис. 2.9). На полюсах магнитопровода 7 расположены две обмотки реле 9, которые можно соединить между собой последовательно или параллельно. Подвижная система реле состоит из Г-образного стального якоря 6,

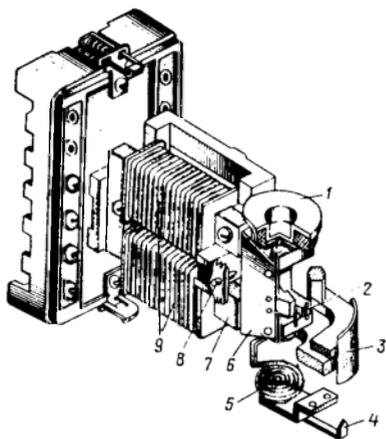


Рис. 29. Электромагнитное вторичное реле тока косвенного действия РТ-40

ния F_T . При токе, равном или большем тока срабатывания, сила F_3 превышает силу F_M , якорь реле 6 поворачивается и связанный с ним подвижной контакт 2 замыкает (размыкает) управляемую электрическую цепь. Подвижная система реле возвращается в начальное положение при токе возврата; коэффициент возврата $k_B = 0,8$.

При перемещении указателя уставки 4 из начального положения, отмеченного на шкале 3, в конечное ток срабатывания увеличивается в два раза. Шкала отградуирована в амперах для схемы последовательного соединения обмоток реле. Переключение обмоток реле с последовательного соединения на параллельное увеличивает токи срабатывания, указанные на шкале 3, в два раза. Потребляемая мощность реле разной чувствительности при минимальной уставке находится в пределах $P_{с.р} = 0,2 \dots 8 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Прохождение по обмотке реле несинусоидальных токов, возникающих, например, вследствие насыщения трансформаторов тока при коротком замыкании, приводит к усиленной вибрации подвижной системы реле и его отказу. Для снижения вибрации у реле тока наряду с механическим гасителем применяется магнитопровод с насыщающимися участками, которые делаются суженными (на рис. 2.1, в показаны штриховыми линиями).

Реле напряжения РН-50 по конструкции мало отличается от реле РТ-40. Обмотки реле напряжения включаются в схему через двухполупериодный выпрямитель, в цепь которого вводится один или два добавочных резистора. Выпрямленный ток имеет пульсирующий характер, однако индуктивность обмотки реле уменьшает пульсацию тока и электромагнитной силы, поэтому вибрация якоря практически отсутствует. В отличие от реле тока реле напряжения не имеет механического гасителя вибрации якоря. Шкала реле проградуирована при включении одного резистора. Чтобы получить шкалу уставок, вдвое большую, необходимо

подвижного контакта 2 и механического гасителя вибрации якоря 1. Положение якоря фиксируется упорами 8 (на рисунке виден только левый упор). В качестве противодействующей служит спиральная пружина 5, одним концом связанная с осью подвижной системы, а вторым — с указателем уставки 4. Изменяя положение указателя уставки, можно непрерывно изменять натяжение пружины, ее противодействующую силу и ток срабатывания реле. При прохождении тока по обмотке реле электромагнитная сила F_3 стремится притянуть якорь к полюсам электромагнита, этому препятствует противодействующая сила F_M , обусловленная силой пружины F_P и силой тре-

включить оба резистора. Потребляемая мощность для всех реле $P_{с.р} \leq 5 \text{ В} \cdot \text{А}$.

На основе реле РН-50 и резисторно-конденсаторных фильтров напряжения прямой и обратной последовательности отечественной промышленностью выпускаются реле напряжения прямой последовательности РНФ-1М и реле напряжения обратной последовательности РНФ-2.

Дифференциальные реле тока. В дифференциальных защитах систем электроснабжения широко применяются дифференциальные реле тока РНТ и ДЗТ. Основными элементами реле являются рассмотренные в § 1.5 насыщающиеся трансформаторы тока (НТТ), к вторичной обмотке которых подключаются реле

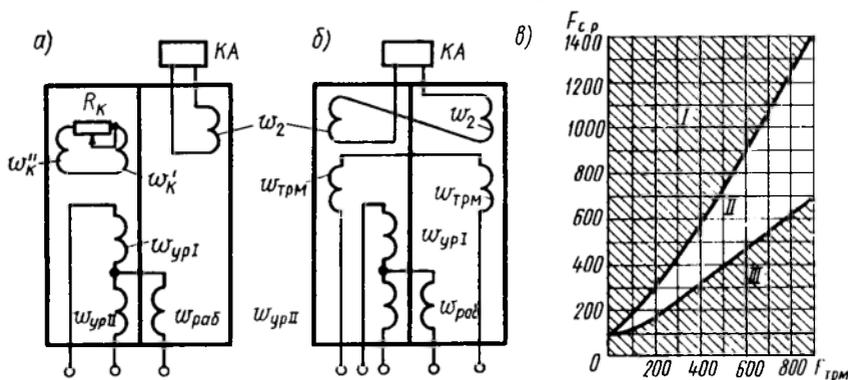


Рис. 2.10. Реле РНТ (а) и ДЗТ (б), характеристики срабатывания реле с торможением (в)

тока РТ-40. Реле РНТ используют насыщающиеся трансформаторы тока без тормозных обмоток (см. рис. 1.10), а реле ДЗТ—с тормозными обмотками (см. рис. 1.11). Насыщающиеся трансформаторы тока, применяемые в реле, отличаются от рассмотренных НТТ числом первичных обмоток. Так, на магнитоприводе НТТ реле РНТ кроме основной рабочей обмотки $w_{раб}$ (w_1) размещены дополнительные обмотки. У реле РНТ-565 они используются как уравнивательные w_{ypI} и w_{ypII} при неравенстве сравниваемых токов (рис. 2.10, а). Обмотки $w_{раб}$, w_{ypI} и w_{ypII} выполнены секционированными с отводами для возможности дискретного изменения параметров реле. Такие же уравнивательные обмотки имеются и у дифференциального реле с торможением ДЗТ-11 (рис. 2.10, б). Во всех обмотках НТТ, кроме вторичной w_2 , предусмотрено переключение чисел витков для изменения уставок срабатывания реле. Промышленностью выпускаются также реле с несколькими тормозными обмотками. У реле ДЗТ ток срабатывания зависит не только от значения тормозного тока, но и от угла между рабочим

и тормозным токами. Тормозная характеристика реле, представляющая собой зависимость МДС срабатывания $F_{с.р}$ от изменения МДС торможения $F_{трм}$, показана на рис. 2.10, в. Здесь цифрой I обозначена зона срабатывания реле, цифрой II — зона срабатывания или торможения в зависимости от угла между током в рабочей обмотке $\omega_{раб}$ и током в тормозной обмотке $\omega_{трм}$, цифрой III — зона торможения.

§ 2.4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Реле времени являются логическими реле с нормируемым временем срабатывания. Они предназначены для создания выдержек времени при передаче сигналов к другим реле логической части устройств релейной защиты и автоматики. В зависимости от оперативного тока различают реле времени постоянного и переменного тока.

Реле времени постоянного тока использует обычно электромагнитную систему с вытягивающимся якорем. Выдержка времени создается часовым механизмом.

На рис. 2.11 изображено одно из таких реле типа ЭВ-122 в отключенном состоянии. При этом ведущая пружина 1 растянута. Она стремится привести во вращение сектор 6, однако этому препятствует палец 8, упирающийся

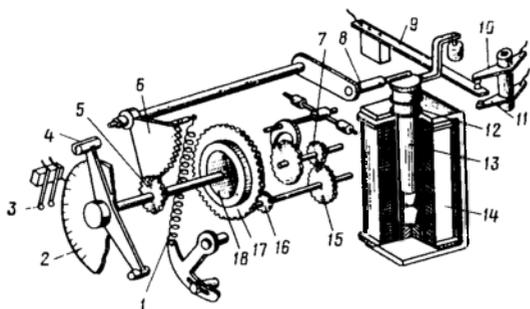


Рис. 2.11. Кинематическая схема реле времени ЭВ-122

в верхнюю часть якоря 13. При подаче напряжения на обмотку реле 14, достаточного для срабатывания реле, якорь 13, преодолевая противодействие пружины 12, вытягивается и убирает препятствие на пути движения пальца 8 и жестко связанного с ним сектора 6, который под действием ведущей пружины 1 начинает вращаться. Это вращение через шестерню 5 передается на валик с укрепленной на нем подвижной частью контакта 4. Начало вращения валика сопровождается сцеплением его с ведущей шестерней 17 посредством фрикционного сцепления 18. Ведущая шестерня 18 через трибку 16 и промежуточные шестерни 15 и 7 связана с часовым механизмом. Время срабатывания реле (выдержка времени) зависит от расстояния между начальными положениями подвижного 4 и неподвижного 3 контактов. Это расстояние изменяется путем перемещения неподвижного контакта по шкале 2, на которой указаны выдержки времени реле в секундах.

Реле времени имеет также переключающие контакты (неподвижные 10 и 11 и подвижный 9). При снятии напряжения с реле возвратная пружина 12 благодаря проскальзыванию фрикционного устройства мгновенно возвращает якорь, часовой механизм и контакты 4 и 9 в исходное положение.

Реле времени выпускают на напряжения $U_{ном} = 24, 48, 110, 220$ В с минимальной выдержкой времени $t_{с.р. min} = 0,1$ с и макси-

мальной выдержкой времени $t_{c.p \max} = 20$ с. Они четко срабатывают при напряжении не менее $U_p = 0,7U_{ном}$. При этом минимальный разброс по времени срабатывания не превышает нескольких процентов максимальной уставки. Мощность, потребляемая обмоткой реле при номинальном напряжении, составляет $P_p = 30$ Вт.

Реле времени переменного тока используются в основном трех разновидностей. Одной из них является реле времени с часовым механизмом и электромагнитным заводом рабочей пружины в момент пуска реле. По принципу действия оно аналогично рассмотренному реле постоянного тока (рис. 2.11). Отличия определяются параметрами обмотки, рассчитанной на переменное напряжение. Основным недостатком этого реле является значительная потребляемая мощность ($P_p = 60$ В·А и более), а также возможность отказа в действии, так как при коротком замыкании напряжение оперативного переменного тока может оказаться меньшим напряжения срабатывания. Обмотка другой разновидности реле времени переменного тока в нормальных условиях находится под напряжением, а якорь — в притянутом состоянии. При снижении или исчезновении напряжения якорь реле отпускается, при этом пускается заторможенный часовой механизм и через заданный промежуток времени реле срабатывает. Недостатком реле является возможность ложного пуска из-за значительного снижения напряжения. Поэтому преимущественное распространение получили реле с синхронным микроэлектродвигателем РВМ-12 и РВМ-13. Эти реле включаются непосредственно в цепи первичных измерительных преобразователей тока.

Реле РВМ (рис. 2.12) имеет синхронный микродвигатель со статорной обмоткой ω и втягивающимся ротором, два насыщающихся трансформатора $TL1$ и $TL2$ и контактную систему $KT.1$ — $KT.3$. Первичные обмотки насыщающихся трансформаторов включаются во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока двух фаз. Реле приходит в действие при замыкании цепи статорной обмотки между выводами $11-9$ или $11-13$. Для правильной работы реле схема устройства защиты выполняется так, чтобы при срабатывании защиты во всех случаях осуществлялось замыкание только одной цепи ($11-9$ или $11-13$).

Для снижения гармонических составляющих в напряжении и токе, подводимых к обмотке электродвигателя, и для снижения пиков напряжения, опасных для изоляции, параллельно вторичной обмотке каждого насыщающегося трансформатора присоединены конденсатор C и резистор R . Реле имеет три контакта, из них два импульсных ($KT.1$ и $KT.2$). Максимальная выдержка времени составляет $t_{c.p \max} = 4$ с у реле РВМ-12 и $t_{c.p \max} = 10$ с у реле РВМ-13.

В зависимости от соединения секций первичной обмотки насыщающихся трансформаторов (последовательно или параллельно) реле четко срабатывает при токах $I_{c.p} = 2,5 \dots 5$ А. Мощность, по-

требляемая реле при двойном токе срабатывания, не превышает $P_p = 10 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Конструкция реле РВМ показана на рис. 2.12, б. При запуске реле обмотка электродвигателя 1 подключается к вторичной обмотке одного из насыщающихся трансформаторов (на рис. 2.12, а замыкаются выводы 11—9 или 11—13), ротор 2 втягивается в межполюсное пространство статора и трибка 3 на оси ротора входит в зацепление с замедляющим трехступенчатым редуктором, через который вращение ротора передается рамке 4 с контактными цилиндрами. Контакты замыкаются с заданной выдержкой времени. При исчезновении тока вращение ротора прекращается и он выходит из межполюсного пространства, расцепляя трибку с редуктором.

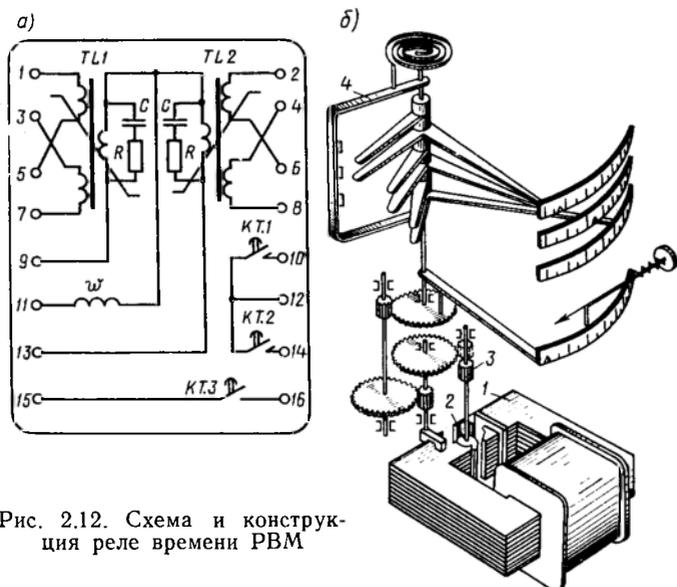


Рис. 2.12. Схема и конструкция реле времени РВМ

Промежуточные реле. Для выполнения промежуточных реле обычно используют электромагнитную систему с поворотным якорем. Промежуточные реле выполняют с одной или несколькими обмотками, которые могут включаться на полное напряжение источника оперативного тока (обмотки напряжения) или последовательно с обмоткой какого-либо реле или аппарата (обмотки тока). Промежуточные реле выполняются с минимальным потреблением мощности обмотками напряжения, чтобы облегчить условия работы контактов в их цепи, а также (что особенно важно для реле переменного тока) снизить мощность источника оперативного тока. Промежуточные реле с обмотками напряжения должны надежно срабатывать при напряжениях $U_p = 0,7 U_{\text{ном}}$.

Потребляемая мощность обмотки тока промежуточного реле определяется из условия ограничения падения напряжения на ней не более 5—10% от номинального напряжения источника опера-

тивного тока. Это необходимо для надежного действия реле или аппарата, последовательно с обмотками которых включена обмотка тока промежуточного реле.

Промежуточные реле имеют низкий коэффициент возврата $k_B \approx 0,1 \dots 0,4$. Однако для них, как и для реле времени, это не имеет значения, так как по условиям работы отпускание реле происходит после отключения от источника питания. К большей части промежуточных реле предъявляется требование быстродействия;

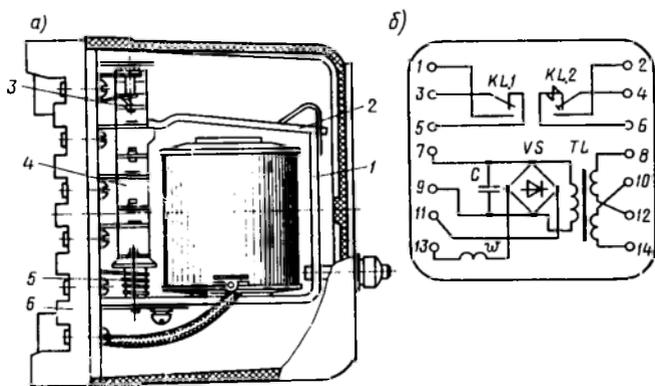


Рис. 2.13. Промежуточные реле РР-23 (а) и РР-341 (б)

их время срабатывания не должно превышать $t_{с.р} \leq 0,01 \dots 0,03$ с.

На рис. 2.13, а показана конструкция промежуточного реле постоянного тока РР-23.

Под действием возвратной пружины 5 шток 4 с подвижными контактами 3 находится в крайнем верхнем положении. При этом замыкающие контакты разомкнуты, а размыкающий контакт 3 замкнут. Якорь 2, упирающийся в шток 4, оттянут вверх. При подключении обмотки реле к напряжению, превышающему напряжение его срабатывания, якорь 2, притягиваясь к полюсу электромагнита 1, воздействует на шток 4, перемещая его вниз и переключая контакты. После отключения обмотки реле возврат подвижной системы в начальное состояние происходит под действием возвратной пружины 5. Реле монтируется на доколе 6.

Эти реле изготовляют на номинальные напряжения $U_{ном} = 24, 48, 110, 220$ В постоянного тока; они четко срабатывают при напряжении $0,7U_{ном}$. Время замыкания контактов при номинальном напряжении $t_{с.р} < 0,06$ с, а потребляемая обмоткой реле мощность $P_p \approx 6$ Вт.

Промежуточное реле переменного тока выполняется с использованием шихтованного магнитопровода, состоящего из набора отдельных штампованных листов электротехнической стали. Такая конструкция магнитопровода необходима для уменьшения потерь на вихревые токи. Кроме того, полюс магнитной си-

стемы снабжается экраном (короткозамкнутым витком) для получения электромагнитной силы, незначительно изменяющейся во времени (см. рис. 2.4).

Одним из таких реле является реле РП-25, устройство и действие которого аналогичны реле постоянного тока. Оно предназначено для питания от измерительного трансформатора напряжения. Его недостатки: возможность отказа в действии при коротких замыканиях и снижении напряжения; значительная мощность, потребляемая при срабатывании. В этом отношении более совершенны промежуточные реле РП-321 и РП-341, подключаемые к измерительным трансформаторам тока.

На рис. 2.13, б показана схема внутренних соединений реле РП-341. В схеме используется электромагнитное реле постоянного тока, обмотка ω которого подключается к двухполупериодному выпрямителю VS , благодаря чему снижается мощность, потребляемая реле при срабатывании, и улучшается работа контактов. Выпрямитель подключается к вторичной обмотке насыщающегося трансформатора TL , первичная обмотка которого имеет две секции, выведенные на зажимы 8—12 и 10—14. В зависимости от схемы соединения этих секций реле имеет два номинальных тока срабатывания: $I_{ном} = 2,5$ А при последовательном соединении и $I_{ном} = 5$ А при параллельном. Секции могут соединяться и на разность токов. Насыщающийся трансформатор ограничивает ток и напряжение во вторичной цепи, при этом облегчаются условия работы контактов реле, управляющих работой РП-341, и условия работы диодов выпрямителя. Кроме того, ограничивается потребление мощности реле при больших кратностях тока. Параллельно выпрямителю к вторичной обмотке насыщающегося трансформатора подключается конденсатор C , который предназначен для сглаживания перенапряжений, обусловленных наличием высших гармонических в ЭДС насыщающегося трансформатора. Конденсатор снижает также потребление мощности реле.

Реле РП-341 имеет два переключающих контакта: $KL.1$ обычного исполнения и $KL.2$, переключающий без разрыва цепи (при срабатывании реле контакт сначала замыкает цепь, присоединенную к выводам 4, а затем размыкает цепь, присоединенную к выводам 4, б). Для повышения коммутационной способности размыкающий контакт помещается внутри магнитопровода, представляющего собой рамку с воздушным зазором в боковой части. Таким образом осуществляется магнитное дутье и облегчаются условия гашения дуги. При этом контакты способны коммутировать ток до 150 А. При токе $I_p = 2I_{ном}$ реле потребляет мощность $P_p = 10$ В·А, а время срабатывания $t_{с.р} = 0,04$ с.

Электромагнитные реле с герметизированными магнитоуправляемыми контактами (герконовые реле). Значительными недостатками электромеханических реле, в том числе и промежуточных, являются наличие открытых ненадежных контактов, подверженных влиянию окружающей среды, а также относительно большое время срабатывания из-за значительной массы подвижного якоря. Попытка ослабить эти недостатки привела к созданию герконовых реле [17]. Основной элемент этого реле — герметизированный магнитоуправляемый контакт (геркон). Это заполненная инертным газом стеклянная колба 1 (рис. 2.14) с впаянными в нее пружинящими пластинами из ферромагнитного материала 2 и обмоткой 3. Пластины одновременно являются магнитопроводом, подвижными частями реле и контактными пружинами. В нор-

мальном режиме пластины разомкнуты и цепь управления разорвана. Ток в обмотке вызывает магнитный поток Φ , проходящий по пластинам. Он создает электромагнитную силу, стремящуюся притянуть пластины друг к другу. Пластины смыкаются и замыкают управляемую цепь, если электромагнитная сила превышает механические силы упругости пластины. Геркон имеет малые размеры, его длина $l \approx 30 \dots 50$ мм, диаметр стеклянной колбы $D \approx 3 \dots 5$ мм, а зазор между пластинами — десятые доли миллиметра.

В связи с малой инерционностью пластин герконовое реле может следовать за изменением синусоидального напряжения и в течение периода срабатывать дважды, поэтому, как правило, реле выполняют для работы на выпрямленном или постоянном напряжении.

Создано множество различных конструкций герконовых реле и с одним, и с несколькими герметизированными контактами. У многоконтактных реле внутри обмотки расположено несколько герконов. В логической части устройств релейной защиты применяются многоконтактные реле РПГ-2 и РПГ-5. Имеются предложения по использованию герконов (без обмотки) в качестве измерительных органов, например токовой защиты [18]. Конструктивные особенности герконового реле обеспечивают высокую надежность коммутации, малое время срабатывания ($t_{с.р} \approx 0,001$ с), длительный срок службы (до 10^8 — 10^{12} срабатываний).

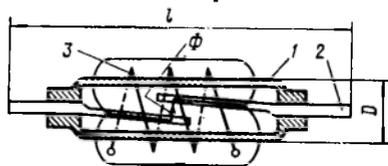


Рис. 2.14. Устройство герконового реле

Указательные реле. Для получения информации о срабатывании, возврате, действии или отпуске различных аппаратов в схемах защиты и автоматики служат указательные реле с последовательным и параллельным включением обмоток. Наиболее распространены реле с последовательным включением обмоток. Их обмотки включаются последовательно с обмотками реле или других аппаратов, действие которых контролируется. Промышленность выпускает электромагнитные указательные реле типа РУ-1 с поворотным якорем для включения в цепь постоянного тока. Они могут быть использованы и в схемах защиты и автоматики на переменном оперативном токе.

Конструкция указательного реле отличается от промежуточного (см. рис. 2.13, а) наличием на якоре сигнального флажка, наличием смотрового окна и конструкцией контактов. При появлении тока в обмотке реле якорь снимает упор с флажка, который выпадает в смотровом окне. Одновременно поворачивается изоляционный барабанчик с контактами, которые в зависимости от исполнения реле замыкают или размыкают сигнальную электрическую цепь. При исчезновении тока в обмотке реле якорь под действием пружины возвращается в начальное состояние, а флажок и контакты реле остаются в положении пос-

ле срабатывания. Этим достигается длительная фиксация срабатывания защиты и автоматики. Возврат флажка и контактов производится вручную.

§ 2.5. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ВЫПОЛНЕНИЕ ИНДУКЦИОННЫХ РЕЛЕ

На индукционном принципе выполняют измерительные реле тока и реле направления мощности. В системах электроснабжения можно еще встретить реле сопротивления и реле частоты, уже снятые с производства. Работа индукционных реле основана на взаимодействии переменных магнитных полей неподвижных обмоток с токами, индуцированными этими полями в подвижном элементе (диске или цилиндрическом роторе). Поэтому на индукционном принципе могут выполняться лишь реле переменного тока.

Мгновенное значение силы взаимодействия между потоком Φ_i и током i при расположении проводника с током длиной Δl в плоскости, перпендикулярной оси потока,

$$F_{ni} = \Delta l B_i i. \quad (2.10)$$

Заменяя B_i потоком Φ_i , можно получить

$$F_{ni} = \Delta l \Phi_i i / S \text{ или } F_{ni} = k \Phi_i i \quad (2.11)$$

При наличии только одного магнитного потока выполнить реле невозможно, так как известно, что сила F_{ni} от взаимодействия тока с потоком, благодаря которому ток возникает, равна нулю [19]. Непременным условием получения вращающего момента на подвижном элементе индукционной системы является наличие не менее двух магнитных потоков (Φ_1 и Φ_2), сдвинутых в пространстве (рис. 2.15, *a*). Возникающий при этом вращающий момент [19]

$$M_{np} = k' \Phi_1 \Phi_2 \sin \psi. \quad (2.12)$$

Таким образом, для получения вращающего момента необходимо также сдвиг по фазе между потоками на угол ψ (рис. 2.15, *b*, *в*). Два магнитных потока, смещенных пространственно и по фазе, можно получить, в частности, с помощью короткозамкнутого витка I , надеваемого на часть магнитопровода (рис. 2.15, *a*). Потоки Φ_1 и Φ_2 обусловлены током I_p в обмотке реле; в ненасыщенной магнитной системе они пропорциональны току. Так как угол ψ при изменении тока не изменяется, то вращающий момент

$$M_{np} = k'' I_p^2. \quad (2.13)$$

В неподвижном диске (цилиндрическом роторе) индуцируются только ЭДС трансформации E_1 и E_2 (рис. 2.15, *б*), которые и обуславливают вращающий момент M_{np} . Во вращающемся диске наряду с ЭДС трансформации появляются также ЭДС резания,

вызванные пересечением магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 вращающимся диском. Эти ЭДС создают в диске токи, которые при взаимодействии с вызвавшими их потоками обуславливают появление тормозных моментов $M_{\text{трм}} = k_d (d\alpha/dt)$, где α — угол поворота подвижной части. Тормозные моменты пропорциональны частоте вращения диска и зависят от магнитных потоков. На подвижную часть реле действуют также тормозной момент пружины M_n и момент инерции $M_{\text{ин}} = J (d^2\alpha/dt^2)$. При этом движение диска (ци-

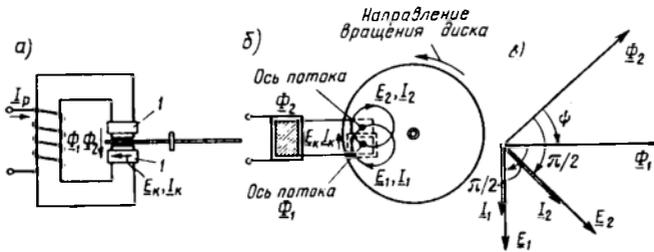


Рис. 2.15. Конструктивная схема и векторная диаграмма индукционного реле тока

линдрического ротора) без учета момента трения определяется условием

$$M_{\text{нр}} = M_{\text{ин}} + M_{\text{трм}} + M_n \quad (2.14)$$

или

$$M_{\text{нр}} - M_n = J (d^2\alpha/dt^2) + k_d (d\alpha/dt). \quad (2.15)$$

Анализ выражения (2.15) показывает, что индукционные системы позволяют выполнить как быстродействующие, так и медленнодействующие реле. Подвижная часть быстродействующих реле за время срабатывания не успевает развить больших окружных скоростей, поэтому можно принять $M_{\text{трм}} = 0$; тогда $M_{\text{нр}} - M_n = J (d^2\alpha/dt^2)$, откуда

$$t = \sqrt{2J\alpha / (M_{\text{нр}} - M_n)}. \quad (2.16)$$

Из выражения (2.16) следует, что для уменьшения времени срабатывания реле необходимо: угол поворота α принять минимальным; иметь минимальный момент инерции J подвижной части (ее выполняют в виде цилиндрического ротора малого диаметра из алюминия); получить максимальный избыточный момент $(M_{\text{нр}} - M_n)$.

Для реле замедленного действия влияние момента инерции $M_{\text{ин}}$ на общее время срабатывания незначительно, поэтому можно принять $M_{\text{ин}} = 0$; тогда $M_{\text{нр}} - M_n = k_d (d\alpha/dt)$, откуда

$$t = k_d \alpha / (M_{\text{нр}} - M_n). \quad (2.17)$$

Таким образом, для получения реле замедленного действия необходимо иметь максимальные значения α и k_d . В существующих конструкциях реле это достигается тем, что их снабжают постоянными магнитами, а подвижную часть выполняют в виде диска. При вращении диск пересекает поле постоянного магнита, в

результате чего возникает дополнительный тормозной момент. Такие реле имеют ограниченно зависимую от тока характеристику выдержки времени. В ее независимой части удастся получить выдержки времени $t_{c.p} > 10$ с.

§ 2.6. ИНДУКЦИОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

Реле тока серии РТ-80 и РТ-90. Эти реле являются комбинированными и состоят из двух элементов: индукционного с диском, создающего ограниченно зависимую выдержку времени, и электромагнитного (отсечки) мгновенного действия, срабатывающего при больших кратностях тока в обмотке реле. Оба элемента ис-

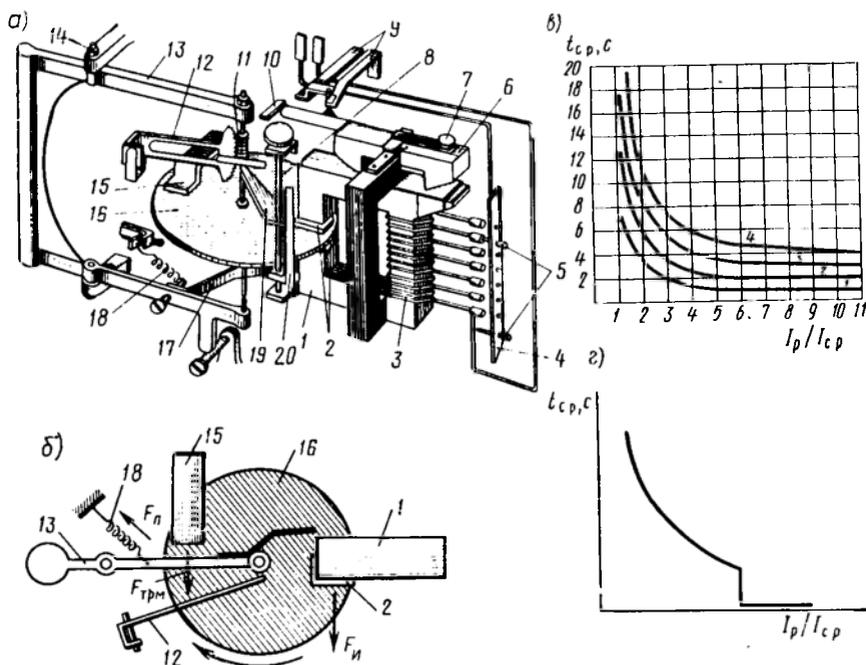


Рис. 2.16. Индукционное реле тока типа РТ-80 и его характеристики

пользуют одну общую магнитную систему (рис. 2.16, а). Реле предназначены для защиты электрических машин, трансформаторов и линий электропередачи при перегрузке и коротких замыканиях.

Индукционный элемент реле состоит из электромагнита 1 с короткозамкнутыми витками 2 на полюсах. Обмотка 3 электромагнита имеет ответвления для изменения тока срабатывания. Ответвления подведены к гнездам штепсельного мостика

4 и переключаются винтами 5. Между полюсами электромагнита расположен алюминиевый диск 16, ось которого укреплена на подвижной рамке 13, которая имеет неподвижную ось вращения 14. При токах в обмотках реле, меньших тока срабатывания индукционного элемента, рамка 13 оттянута пружиной 18 в крайнее положение, при этом червяк 11, насаженный на ось диска, не сцеплен с зубчатым сегментом 12, имеющим неподвижную ось вращения и способным свободно перемещаться вверх и вниз. Нижнее положение сегмента фиксируется устройством, с помощью которого устанавливается выдержка времени. Это устройство состоит из регулировочного винта 8 и движка 19. При перемещении вверх сегмент 12 рычагом поднимает коромысло 10.

Диск вращается при токе $I_p = (0,1 \dots 0,2) I_{c.p}$ срабатывания индукционного элемента. При этом вращение диска не приводит к замыканию контактов. На вращающийся диск действуют сила F_n , вызывающая вращение диска, и противодействующая $F_{трм}$, препятствующая его вращению (рис. 2.16, б). Противодействующая сила возникает в связи с пересечением вращающимся диском магнитного потока постоянного магнита 15 и пропорциональна частоте вращения диска. Поэтому при увеличении тока в обмотке реле наряду с ростом силы F_n возрастает сила $F_{трм}$. Установившаяся частота вращения диска определяется равновесием этих сил. Их равнодействующая сила F' стремится повернуть диск вместе с рамкой 13 вокруг оси рамки. Этому препятствует сила пружины F_n .

Током срабатывания индукционного элемента называется такой минимальный ток, при котором сила F' преодолет силу пружины F_n и рамка 13 вместе с диском поворачивается, произведя сцепление червяка 11 с зубчатым сегментом 12. При этом благодаря вращению диска червяк 11 поднимает зубчатый сегмент 12. Его рычаг в конце пути соприкасается с коромыслом 10 якоря 6, поднимая его вверх, и якорь 6 поворачивается на оси так, что воздушный зазор между электромагнитом 1 и правым концом якоря 6 уменьшается. Якорь быстро притягивается к электромагниту, замыкая контакты 9 с помощью коромысла 10.

В процессе работы индукционного элемента при наличии сцепления между червяком и сегментом на вращающийся диск кроме сил F_n и $F_{трм}$ действует также сила, обусловленная трением в червячной передаче и собственной массой сегмента. Эта сила возникает при зацеплении червяка с сегментом. При этом частота вращения диска и результирующая сила F' уменьшаются, что может привести к расцеплению червячной передачи. Для предотвращения этого служит стальная скоба 17, которая за счет потоков рассеяния обеспечивает дополнительное усилие, удерживающее подвижную рамку в притянutom положении.

Время от момента сцепления червяка с зубчатым сегментом до момента замыкания контактов является временем срабатывания

реле — *выдержкой времени*. Это время при заданной уставке зависит только от скорости подъема сегмента вверх. Скорость подъема сегмента определяется частотой вращения диска, т. е. зависит от тока. Чем больше ток, тем больше частота вращения диска и скорость подъема сегмента и тем меньше выдержка времени реле.

Магнитная система реле РТ-80 выполнена так, что примерно при семикратном токе срабатывания она насыщается. Дальнейшее увеличение тока не приводит к росту магнитного потока, поэтому остаются постоянными вращающий момент, частота вращения диска и выдержка времени. Таким образом, реле РТ-80 имеет ограниченно независимую характеристику выдержки времени.

Выдержка времени реле зависит также от длины перемещения сегмента 12, определяемой его начальным положением, которое может изменяться при перемещении движка 19 по винту 8. Благодаря этому можно получить серию характеристик выдержек времени. Необходимо иметь в виду, что на шкале 20 (рис. 2.16, а) указаны пределы установки выдержки времени в независимой части характеристики. Так, у реле РТ-81 минимальная уставка равна 1 с, а максимальная — 4 с (рис. 2.16, в). Реле РТ-82 имеет иные пределы регулирования уставок: минимальная уставка равна 4 с, а максимальная — 16 с.

Наряду с реле РТ-80 отечественная промышленность выпускает реле РТ-90. У них диапазон регулирования уставки такой же, как у реле РТ-81, но сами характеристики мало зависят от кратности тока в обмотке реле.

Электромагнитный элемент реле использует электромагнит 1 индукционной системы. Подвижной частью является якорь 6 с коромыслом 10. Ток срабатывания электромагнитного элемента (отсечки) устанавливается винтом 7 путем изменения воздушного зазора между электромагнитом 1 и правым концом якоря 6. На головке винта имеются метки с цифрами 2—8. Они соответствуют кратностям тока срабатывания отсечки, т. е. отношению тока срабатывания отсечки к току срабатывания индукционного элемента. Таким образом, с помощью винта устанавливается не ток срабатывания отсечки, а его кратность по отношению к установленному на реле току срабатывания индукционного элемента. При срабатывании электромагнитного элемента реле действует без выдержки времени. Поэтому реле РТ-80 (РТ-90) имеет комбинированную характеристику выдержки времени (рис. 2.16, г). Для уменьшения вибрации якоря при срабатывании на часть его правого конца насажен короткозамкнутый виток. Реле РТ-80 (РТ-90) выполняют на разные пределы тока срабатывания, с различной контактной системой. Например, реле РТ-85, предназначенное для защиты на оперативном переменном токе, имеет усиленный переключающий контакт, который способен коммутировать ток до 150 А.

Использование в одном реле индукционного и электромагнитного принципов, а также применение в индукционном элементе сцепления червяка с сегментом и постоянного магнита для создания противодействующей силы позволяют выполнить реле с надежной контактной системой, с коэффициентом возврата индукционного элемента не менее $k_v=0,8$ и с малой инерционной ошибкой. К достоинствам реле относится то, что с помощью одного ре-

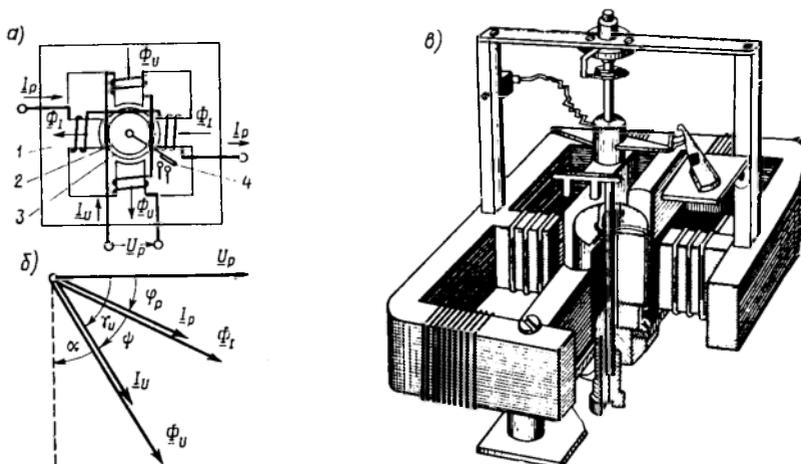


Рис. 2.17. Схематическое изображение (а), векторная диаграмма (б) и конструкция (в) индукционного реле направления мощности

ле можно выполнить быстродействующую защиту от коротких замыканий и защиту с выдержкой времени, действующую при перегрузке. Недостатком реле является его сложность, а также значительная потребляемая мощность при срабатывании. При токе, равном току уставки, потребляемая мощность реле РТ-80 около 10 В·А, а реле РТ-90 достигает 30 В·А. При срабатывании реле потребляемая мощность увеличивается на 15%.

Реле направления мощности РБМ. Реле направления мощности является измерительным органом с двумя воздействующими электрическими величинами, сравниваемыми по фазе. Реле выпускают на основе четырехполюсной магнитной системы 1 (рис. 2.17, а).

Для уменьшения магнитного сопротивления системы между полюсами магнитопровода помещают неподвижный цилиндрический сердечник 2. Подвижным элементом системы является выполненный из алюминия полый цилиндрический ротор 3, боковые стенки которого расположены в зазоре между стальным сердечником 2 и полюсами магнитной системы. Ротор укреплен на оси, свя-

занной с подвижным контактом 4. Начальное положение ротора зафиксировано пружиной (на рисунке не показана).

Реле имеет две обмотки — тока и напряжения. Обмотка тока размещается на двух противоположных полюсах (рис. 2.17, а), а обмотка напряжения — на двух других полюсах или непосредственно на магнитопроводе (рис. 2.17, в). При этом магнитный поток Φ_I , созданный током I_p , проходящим по обмотке тока, и магнитный поток Φ_U , обусловленный напряжением U_p на зажимах обмотки напряжения, сдвинуты между собой в пространстве на угол $\pi/2$.

При построении векторной диаграммы реле (2.17, б) за исходные величины приняты напряжение U_p и отстающий от него на угол φ_p ток I_p . Ток в обмотке напряжения I_U сдвинут по фазе относительно напряжения U_p на угол γ_U . У реле РБМ сопротивление обмотки напряжения таково, что угол γ_U (естественный угол) обычно составляет $\pi/3$. Угол α дополняет его до $\pi/2$.

Если пренебречь потерями в стали и размагничивающим действием тока ротора, то магнитные потоки Φ_I и Φ_U совпадают по фазе с вызывавшими их токами, соответственно I_p и I_U . Вращающий момент индукционного реле, согласно (2.12), $M_{вр} = k\Phi_U\Phi_I \sin \psi$. Для ненасыщенной магнитной системы $\Phi_I \sim I_p$ и $\Phi_U \sim I_U \sim U_p$, поэтому $M_{вр} = kU_p I_p \sin \psi$. По векторной диаграмме (рис. 2.17, б) $\psi = [\pi/2 - (\varphi_p + \alpha)]$ и

$$M_{вр} = kU_p I_p \sin [\pi/2 - (\varphi_p + \alpha)] = kU_p I_p \cos (\varphi_p + \alpha). \quad (2.18)$$

Выражение (2.18) определяет вращающий момент реле смешанного типа. Из него следует, что при $\cos(\varphi_p + \alpha) > 0$ момент положительный, а при $\cos(\varphi_p + \alpha) < 0$ — отрицательный. Максимальное значение положительного момента наступает при $\cos(\varphi_p + \alpha) = 1$, т. е. при $\varphi_p = -\alpha$. Угол φ_p , при котором положительный вращающий момент максимален, называется *углом максимальной чувствительности* $\varphi_{р\max \psi}$. Таким образом, угол $\varphi_{р\max \psi}$ всегда равен и противоположен по знаку углу α , т. е. $\varphi_{р\max \psi} = -\alpha$.

Реле с различными углами α и соответственно с различными углами максимальной чувствительности получают путем изменения угла γ_U . Для этого последовательно с обмоткой напряжения реле включаются добавочные активное и емкостное сопротивления

При угле $\gamma_U = \pi/2$ угол $\alpha = 0$ и вращающий момент

$$M_{вр} = kU_p I_p \cos \varphi_p. \quad (2.19)$$

Такое реле получило название *косинусного*. Если угол $\gamma_U = 0$, то угол $\alpha = \pi/2$ и вращающий момент

$$M_{вр} = kU_p I_p \sin \varphi_p. \quad (2.20)$$

Реле с таким выражением вращающего момента называется *синусным*. Положительный знак момента по (2.20) достигается изменением полярности выводов одной из обмоток.

Направление тока в обмотке изменится, если поменять местами ее начало и конец в схеме включения реле, поэтому, принимая начало одной из обмоток произвольно, началом второй считают тот вывод, которому соответствует положительный вращающий момент (реле срабатывает) при указанном угле максимальной чувствительности. Начало обмоток обозначают точками.

Конструкция реле направления мощности РБМ с одним контактом приведена на рис. 2.17, в. Выпускается и реле двустороннего действия. Оно имеет два разомкнутых контакта: один из них замыкается при положительном вращающем моменте, а второй — при отрицательном.

Работа реле направления мощности определяется его характеристиками: *угловой*, представляющей собой зависимость мощности срабатывания (произведение напряжения на ток при срабатывании) от угла φ_p , т. е. $S_{c.p} = f(\varphi_p)$, или напряжения (тока) срабатывания от угла при заданном токе (напряжении), т. е.

$U_{c.p} = f(\varphi_p)$ или $I_{c.p} = f(\varphi_p)$ соответственно (рис. 2.18, а); *вольт-амперной*, представляющей собой зависимость напряжения срабатывания от тока при угле максимальной чувствительности, т. е. $U_{c.p} = f(I_p)$ при $\varphi_p = \varphi_{p, \max \chi}$ (рис. 2.18, ж). Характеристики зависят от типа реле и его выполнения.

В реальных реле на подвижную часть наряду с вращающим моментом действуют сила трения и удерживающей пружины. Для их преодоления при срабатывании реле необходим минимальный вращающий момент $M_{вр \min}$. Для срабатывания реле направления мощности со смешанной характеристикой должно выполняться условие

$$kU_p I_p \cos(\varphi_p + \alpha) = M_{вр \min} \quad (2.21)$$

или

$$S_{c.p} = U_p I_p = M_{вр \min} / [k \cos(\varphi_p + \alpha)] \quad (2.22)$$

Так как $M_{вр \min}/k$ — величина постоянная, то $S_{c.p}$ изменяется с изменением угла φ_p , принимая минимальное значение $S_{c.p \min}$ при $\varphi_{p \max \chi}$, при котором $\cos(\varphi_p + \alpha) = 1$, т. е. $S_{c.p \min} = M_{вр \min}/k$.

С учетом этого выражение (2.22) принимает вид

$$S_{c.p} = S_{c.p \min} / [\cos(\varphi_p + \alpha)]. \quad (2.23)$$

В соответствии с выражением (2.23) на рис. 2.18, а построена угловая характеристика в прямоугольной системе координат. Мощность срабатывания, как указывалось, принимает минимальное значение $S_{c.p \min}$ при $\varphi_{p \max \chi}$. По мере уменьшения $\cos(\varphi_p + \alpha)$ мощность $S_{c.p}$ возрастает и становится бесконечной при $\cos(\varphi_p + \alpha) = 0$, что наблюдается при углах $\varphi_p = (\pi/2 - \alpha)$ и $\varphi_p = -(\pi/2 + \alpha)$.

Угловую характеристику реле можно построить в полярной системе координат (рис. 2.18, б). При этом угол φ_p отсчитывается

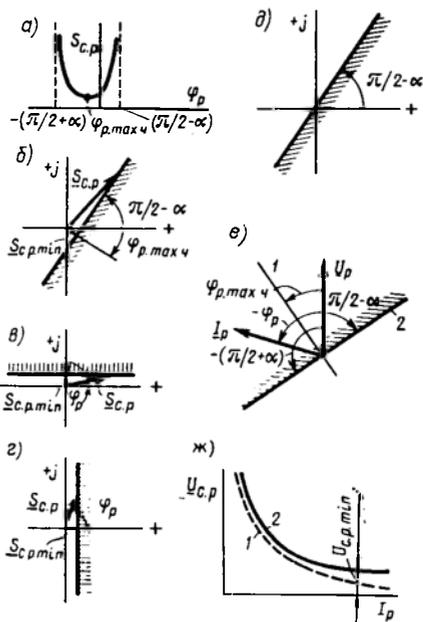


Рис. 2.18. Характеристики индукционного реле направления мощности

от положительной оси против часовой стрелки при его положительных значениях. Мощность срабатывания принимает минимальное значение $S_{c.p \min}$ при угле $\varphi_{p \max} = -\alpha$. С изменением угла φ_p мощность срабатывания увеличивается так, что конец радиуса-вектора $S_{c.p}$ скользит по прямой, перпендикулярной радиусу-вектору $\underline{S}_{c.p \min}$. Эта прямая и является угловой характеристикой реле в полярной системе координат или в комплексной плоскости мощностей. Реле направления мощности срабатывает, если конец вектора полной мощности $\underline{S} = \widehat{UI}$ находится в пределах заштрихованной области комплексной плоскости или касается угловой характеристики. Аналогично строят угловые характеристики синусного (рис. 2.18, в) и косинусного (рис. 2.18, г) реле.

У идеальных реле силы трения и удерживающей пружины отсутствуют, поэтому $S_{c.p \min} = 0$, в связи с чем их идеальные угловые характеристики отличаются от рассмотренных тем, что проходят через начало координат (рис. 2.18, д).

При анализе работы реле направления мощности часто пользуются его идеальной угловой характеристикой. При этом в ряде случаев целесообразно считать фиксированным вектор напряжения \underline{U}_p и относительно него производить отсчет углов φ_p сдвига фаз между \underline{U}_p и \underline{I}_p (рис. 2.18, е). Следует иметь в виду, что угол φ_p считается положительным при отстающем по фазе токе (отсчет по часовой стрелке) и отрицательным — при опережающем.

Прямая, проведенная под углом $\varphi_{p \max}$ к вектору \underline{U}_p является *линией максимальной чувствительности* (1 на рис. 2.18, е). Зона работы реле ограничивается *линией нулевой чувствительности* (2 на рис. 2.18, е), проведенной перпендикулярно линии максимальной чувствительности. С вектором напряжения \underline{U}_p она образует углы $\varphi_p = (\pi/2 - \alpha)$ и $\varphi_p = -(\pi/2 + \alpha)$, при которых $\cos(\varphi_p + \alpha) = 0$ и вращающий момент $M_{вр} = 0$. Таким образом, зона работы реле ограничивается углами $-(\pi/2 + \alpha) \leq \varphi_p \leq (\pi/2 - \alpha)$, отсчитанными от вектора напряжения \underline{U}_p . При расположении вектора тока \underline{I}_p в этой зоне, т. е. слева от линии нулевой чувствительности, реле мощности срабатывает.

Для построения вольт-амперной характеристики $U_{c.p} = f(I_p)$ при $\varphi_{p \max}$ используется выражение (2.22). На рис. 2.18, ж кривая 1 — расчетная вольт-амперная характеристика ($U_{c.p} = f(S_{c.p \min}/I_p)$), а кривая 2 — характеристика, полученная экспериментально; она показывает, что начиная с некоторого значения тока I_p напряжение $U_{c.p}$ перестает уменьшаться. Это объясняется насыщением магнитной системы реле. Таким образом, экспериментальная вольт-амперная характеристика дает возможность определить минимальное напряжение $U_{c.p \min}$, необходимое для сра-

бывания реле. Насыщение магнитной системы снижает чувствительность реле, так как при $U_{c.p \min}$ и росте тока увеличивается $S_{c.p \min} = U_{c.p \min} I_p$.

Таким образом, если при коротком замыкании к реле подводится напряжение $U_p < U_{c.p \min}$, то оно не сможет сработать. В таких случаях считают, что реле имеет *мертвую зону*.

§ 2.7. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ С ПОСТОЯННЫМ МАГНИТОМ

Электромеханические реле с постоянным магнитом разделяют на магнитоэлектрические и поляризованные реле. Как те, так и другие имеют малое потребление мощности и являются высокочувствительными и быстродействующими реле; благодаря постоянному магниту они реагируют на направление постоянного тока в обмотке. В связи с этим эти реле применяются, например, в качестве реагирующих элементов (нуль-органов) полупроводниковых схем сравнения.

Поляризованные реле. Поляризованным называется электрическое реле постоянного тока, изменение состояния которого зависит от полярности его входной воздействующей величины. На подвижную систему реле действуют два независимых магнитных потока: один $\Phi_{раб}$ — рабочий поток, другой Φ_n — полярирующий. Первый создается постоянным током, проходящим по обмотке реле, второй — в большинстве случаев постоянным магнитом. На рис. 2.19, а, б схематически изображены возможные конструкции таких реле.

В дифференциальной системе (рис. 2.19, а) весь рабочий магнитный поток замыкается через воздушный зазор и име-

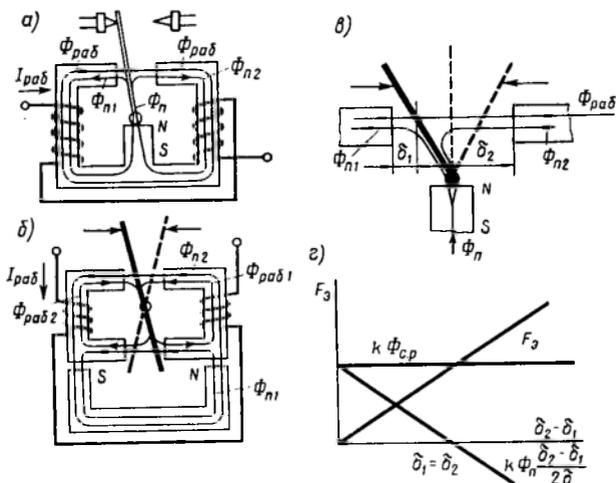


Рис. 2.19. Поляризованное реле и его характеристики

ет одно направление. Поляризующий поток Φ_n распределяется на два потока: Φ_{n1} и Φ_{n2} . Они в общем случае не равны и в воздушном зазоре имеют противоположные направления. В мостовой системе поляризующий поток в зазоре имеет одно направление, а составляющие рабочего потока направлены в противоположные стороны (рис. 2.19, б). Более проста дифференциальная система. Однако мостовая система в связи с характером распределения потоков позволяет осуществить более чувствительные реле.

Если предположить, что все магнитное сопротивление дифференциальной системы сосредоточено в воздушном зазоре, то полярирующие магнитные потоки Φ_{n1} и Φ_{n2} обратно пропорциональны магнитным сопротивлениям соответствующих частей δ_1 и δ_2 воздушного зазора $\delta = \delta_1 + \delta_2$. Магнитное сопротивление пропорционально длине воздушного промежутка, поэтому, согласно рис. 2.19, а, $\Phi_{n1}/\Phi_{n2} = \delta_2/\delta_1$.

Так как $\Phi_n = \Phi_{n1} + \Phi_{n2}$, то

$$\Phi_{n1} = \Phi_n \delta_2 / \delta; \quad \Phi_{n2} = \Phi_n \delta_1 / \delta.$$

При прохождении по обмотке реле постоянного тока появляется рабочий магнитный поток $\Phi_{раб}$, направление которого зависит от полярности тока. В воздушных зазорах δ_1 и δ_2 создаются результирующие магнитные потоки соответственно

$$\Phi_1 = \Phi_{раб} - \Phi_{n1} = \Phi_{раб} - \Phi_n \delta_2 / \delta; \quad \Phi_2 = \Phi_{раб} + \Phi_{n2} = \Phi_{раб} + \Phi_n \delta_1 / \delta.$$

На якорь реле действует электромагнитная сила $F_э = k'(\Phi_2^2 - \Phi_1^2)$, стремящаяся притянуть его к правому полюсу. После подстановки в выражение для $F_э$ значений потоков Φ_1 и Φ_2 и соответствующих преобразований получим

$$F_э = k[\Phi_{раб} - \Phi_n(\delta_2 - \delta_1)/(2\delta)]. \quad (2.24)$$

В условиях срабатывания $F_э = 0$ и $\Phi_{раб} = \Phi_{с.р} = \Phi_n(\delta_2 - \delta_1)/(2\delta)$. Левая часть равенства — постоянная величина, а правая зависит от $(\delta_2 - \delta_1)$. При движении якоря она уменьшается до нуля, а затем изменяет знак и увеличивается. Поэтому электромагнитная сила $F_э$ по мере движения якоря при срабатывании реле нарастает (рис. 2.19, в). Якорь остается в крайнем правом положении и после отключения обмотки реле. Для возвращения его в крайнее левое положение необходимо подать в обмотку ток противоположного направления. Таким образом, поляризованное реле обладает направленностью действия.

Как следует из выражения (2.24), электромагнитная сила $F_э$ линейно зависит от рабочего потока $\Phi_{раб}$, т. е. от подведенной к обмотке реле электрической величины. Поэтому диапазон ее изменения от минимального до возможного максимального значения относительно невелик. Это позволяет обеспечить надежную работу реле при малых значениях подведенной электрической величины, а при ее больших значениях избежать вибрации и ударов подвижной части реле. В этом одно из преимуществ поляризованного реле перед другими электромагнитными реле, у которых сила $F_э$ является квадратичной функцией подведенной электрической величины. Другими преимуществами реле являются его высокая чувствительность и быстродействие. Оно имеет значительно меньшее потребление мощности при срабатывании, чем другие электромагнитные реле ($P_p = 5 \cdot 10^{-3}$ Вт). Время срабатывания реле составляет $t_{с.р} = 2 \dots 3$ мс.

Магнитоэлектрические реле. Действие магнитоэлектрического реле основано на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и тока в обмотке, расположенной на подвижной рамке. При этом сила, действующая на подвижную рамку,

$$F = kBI_p \omega l, \quad (2.25)$$

где B — индукция в воздушном зазоре, обусловленная постоянным магнитом, Тл; I_p — ток в обмотке реле, А; ω — число витков обмотки; l — активная длина витка обмотки, м.

Как и у поляризованного реле, сила F имеет линейную зависимость от тока в обмотке. С изменением направления постоянного тока изменяется направление силы, т. е. реле обладает направленностью действия. Наличие поля постоянного магнита обеспечивает очень высокую чувствительность реле. Потребляемая мощность при срабатывании может составлять $P_p = 10^{-10}$ Вт.

Глава 3

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 3.1. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ И МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

Полупроводниковые диоды VD и триоды VT стали основой создания релейной защиты и автоматики второго поколения. В настоящее время в этих устройствах начинает широко применяться элементная база вычислительной техники — *полупроводниковые интегральные микросхемы* (операционные усилители, компараторы и другие элементы). Интегральная микросхема — это сложное полупроводниковое устройство. Его элементы — диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы — формируются в небольшом объеме полупроводникового материала или на его поверхности путем выращивания кристаллов и напыления пленок. В процессе их формирования осуществляются и соединения между ними в соответствии со схемой, при этом резко сокращается число внешних проводников, упрощается монтажная схема, уменьшается объем устройства и повышается его надежность. В зависимости от функционального назначения интегральные микросхемы делят на *аналоговые* и *цифровые*. К первым относят операционные усилители. Они преобразуют непрерывные сигналы и имеют широкие возможности для использования их в измерительных органах. На основе цифровых микросхем выполняют, в частности, логическую часть устройств релейной защиты и автоматики. Они преобразуют и обрабатывают дискретные сигналы, выраженные в двоичном или другом цифровом коде. Использование полупроводниковой элементной базы в устройствах релейной защиты и автоматики позволяет повысить их быстродействие, уменьшить массу и габаритные размеры, значительно сократить потребление мощности. Кроме того, в связи с отсутствием движущихся частей и контактов устройства на полупроводниках имеют более высокую надежность по сравнению с электромеханическими системами. Наиболее существенный недостаток полупроводников — зависимость их

параметров от температуры. Однако при соответствующем выполнении элементов эти недостатки можно свести к допустимым пределам. Схемы полупроводниковых элементов, в том числе и интегральные микросхемы, содержат полупроводниковые кристаллические диоды и триоды. На их основе выполняют и измерительную, и логическую части устройств релейной защиты и автоматики. Поэтому знакомство с полупроводниковыми элементами следует начать с рассмотрения принципа работы и схем включения полупроводниковых диодов и триодов.

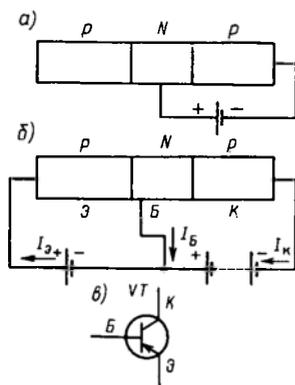


Рис. 3.1. Кристаллический триод (транзистор)

Одна из областей P называется *эмиттером* \mathcal{E} , вторая — *коллектором* \mathcal{K} , а область с проводимостью N — *базой* \mathcal{B} или *основанием*. Если между базой и коллектором приложить внешнее напряжение так, чтобы база получила более положительный потенциал (рис. 3.1, а), то в цепи коллектор — база будет проходить обратный ток $I_{\mathcal{K}\mathcal{B}}$, который весьма мал, — транзистор закрыт. Однако с момента приложения напряжения между базой и эмиттером так, чтобы эмиттер получил более положительный потенциал, в цепи эмиттер — база начнет проходить ток $I_{\mathcal{E}}$ в прямом направлении (рис. 3.1, б). При этом и ток коллектора $I_{\mathcal{K}}$ будет возрастать; он станет примерно равным току эмиттера. Таким образом, меняя ток эмиттера $I_{\mathcal{E}}$, можно менять ток коллектора $I_{\mathcal{K}}$. Условное изображение транзистора показано на рис. 3.1, в.

Так как часть тока $I_{\mathcal{E}}$ ответвляется в цепь базы $I_{\mathcal{B}}$, то коллекторный ток меньше тока эмиттера: $I_{\mathcal{K}} = I_{\mathcal{E}} - I_{\mathcal{B}}$.

Степень уменьшения тока $I_{\mathcal{K}}$ характеризуется коэффициентом передачи тока $h_{21\mathcal{B}} = \Delta I_{\mathcal{K}} / \Delta I_{\mathcal{E}}$. Поскольку $h_{21\mathcal{B}} = \text{const}$, ток коллектора

$$I_{\mathcal{K}} = h_{21\mathcal{B}} I_{\mathcal{E}} = I_{\mathcal{B}} h_{21\mathcal{B}} / (1 - h_{21\mathcal{B}}) = h_{21\mathcal{E}} I_{\mathcal{B}}.$$

Для плоскостных транзисторов $h_{21\mathcal{B}} = 0,9 \dots 0,98$. Таким образом, ток коллектора значительно больше тока базы. Так, при $h_{21\mathcal{B}} = 0,95$ ток коллектора $I_{\mathcal{K}} = 19 I_{\mathcal{B}}$, т. е. происходит усиление тока: ток выходной цепи $I_{\mathcal{K}}$ больше тока входной цепи $I_{\mathcal{B}}$, так как $h_{21\mathcal{E}} > 1$. Кроме того, сопротивление цепи эмиттер — база мало, а цепи эмиттер — коллектор весьма велико. Поэтому напряжение выходной цепи $U_{\text{вых}}$ — нагрузки транзистора $R_{\text{н}}$ (рис. 3.2) — значительно больше, чем напряжение входной $U_{\text{вх}}$. Поэтому происходит усиление и напряжения, в результате чего значительно усиливается мощность.

В схемах включения транзистора один из его выводов является входным, другой — выходным, а третий — общим относительно входной и выходной це-

лей. В зависимости от того, какой из выводов является общим, различают схемы с *общей базой* (рис. 3.2, а), *общим эмиттером* (рис. 3.2, б) и *общим коллектором* (рис. 3.2, в). Индексы в обозначении коэффициентов h_{21} передачи и усиления тока относятся к одноименным схемам. Чаще других применяется схема с общим эмиттером, как обеспечивающая наибольшее усиление мощности. Наряду с транзисторами типа *P-N-P* существуют транзисторы с проводимостью *N-P-N*. При замене одного

транзистора другим необходимо изменить полярность напряжения E_k его питания. Рассмотренный транзистор называется *биполярным* в отличие от *униполярного полевого транзистора* [7].

Наряду с транзисторами в устройствах защиты и автоматики применяются диоды. Среди них такие, например, как стабилитрон. Он представляет собой кремниевый диод, способный длительно работать в

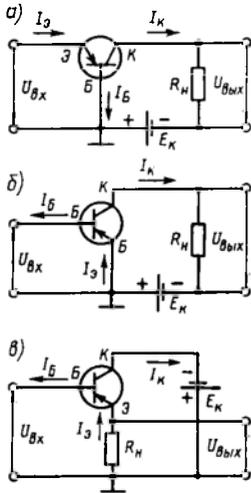


Рис. 3.2. Схемы включения транзистора

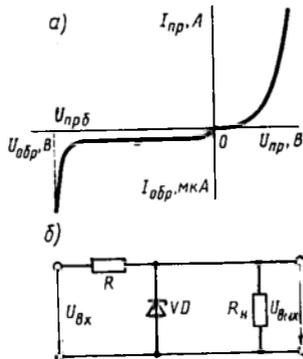


Рис. 3.3. Характеристика стабилитрона и его включение

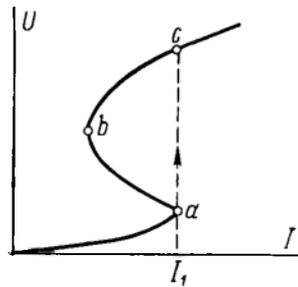


Рис. 3.4. Характеристика туннельного диода

режиме обратного пробоя. На обратной ветви его характеристики (рис. 3.3, а) имеется точка, соответствующая напряжению пробоя $U_{прб}$ *P-N*-перехода. После пробоя его обратный ток может изменяться в широких пределах, а обратное напряжение при этом остается практически неизменным. Это свойство стабилитрона используют для получения стабильного напряжения при изменяющемся напряжении источника.

На рис. 3.3, б показана схема включения стабилитрона. К источнику напряжения $U_{вх}$ диод *VD* подключен в обратном направлении через резистор *R* с большим сопротивлением. Напряжение $U_{вх}$ всегда превышает напряжение $U_{прб}$, но изменяется в некоторых пределах. Напряжение $U_{вых}$ на нагрузке R_n остается практически постоянным.

В отличие от стабилитронов *туннельные диоды* включаются в схемы переменного тока. Вольт-амперная характеристика туннельного диода имеет участок *ab* с отрицательным динамическим сопротивлением (рис. 3.4). При изменении тока от нуля до некоторого значения I_1 (точка *a* на характеристике) падение напряжения на диоде плавно увеличивается. Если ток в цепи превысит значение I_1 , то падение напряжения на диоде увеличится скачкообразно (точка *c*). При уменьшении тока уменьшается и напряжение, сначала незначительно (участок *cb*), а затем скачком до нулевого значения. Отменное свойство диода позволяет использовать его, например, в схемах сравнения измерительного органа с одной воздействующей величиной,

§ 3.2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЛОГИЧЕСКИХ ОРГАНОВ

Комбинационные логические элементы производят операции И, ИЛИ, НЕ над дискретными сигналами: логической единицей (1) и нулем (0). На рис. 3.5, а показана схема диодного элемента, реализующего логическую операцию ИЛИ (рис. 3.5, б) для единиц в виде положительных напряжений $U_1—U_n$ (сигналов $X_1—X_n$) и логическую операцию И (рис. 3.5, в) для единиц в виде отрицательных напряжений ($-U_1—(-U_n)$) (сигналов $X_1—X_n$).

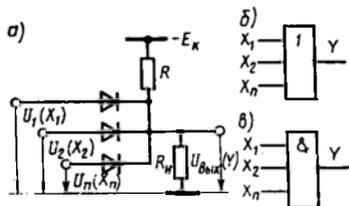


Рис. 3.5. Схема диодных логических элементов ИЛИ (И) (а) и их условные графические обозначения (б, в)

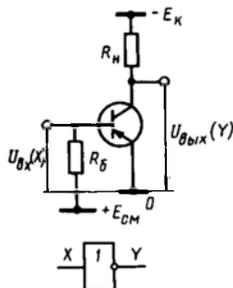


Рис. 3.6. Схема логического элемента НЕ (транзисторного инвертора)

Для получения положительного напряжения $U_{вых}$ (сигнала Y) на выходе достаточно на один из входов подать положительное напряжение, например U_2 (сигнал X_2). При этом открывается соответствующий диод и на резисторе R_n появляется напряжение $U_{вых}$, практически равное напряжению U_2 . Для получения на выходе отрицательного сигнала $-U_{вых}$, обусловленного $-E_k$, необходимо, чтобы при подаче сигналов на вход все диоды закрылись. Это возможно лишь при наличии отрицательных напряжений ($-U_1—(-U_n)$) — на всех входах.

Логическая операция НЕ реализуется транзисторным инвертором (рис. 3.6). Если сигнал на входе отсутствует $U_{вх}=0$ (сигнал $X=0$), то благодаря положительному смещению (потенциал базы $+E_{см}$) транзистор закрыт, на выходе схемы — отрицательный потенциал — напряжение $-U_{вых} \approx -E_k$ (сигнал $Y=1$). При появлении сигнала $X=1$ на входе (напряжение $U_{вх}>0$) транзистор открывается и напряжение на выходе исчезает (сигнал $Y=0$). Рассмотренные логические операции выполняются и на основе магнитных элементов [7].

Логический элемент времени, выполняемый на основе полупроводниковых приборов, обычно использует для создания выдержки времени заряд или разряд конденсатора. Принципиальная схема такого элемента показана на рис. 3.7. При отсутствии сигнала на входе через эмиттерный переход транзистора VT проходит прямой ток, поэтому транзистор открыт и конденсатор C закорочен. При этом к диоду VD приложено обратное напряжение и он закрыт. Сигнал на выходе отсутствует ($U_{\text{ВЫХ}} = 0$).

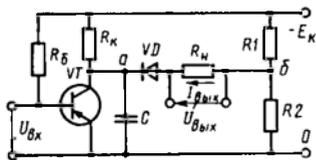


Рис. 3.7. Схема элемента времени

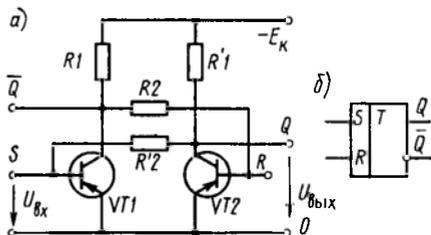


Рис. 3.8. Схема симметричного триггера (а) и его условное изображение (б)

Устройство действует, если на входе появляется положительное напряжение $U_{\text{вх}}$, при этом транзистор закрывается и конденсатор начинает заряжаться. С течением времени потенциал точки a становится ниже потенциала точки b и диод VD открывается, замыкая цепь выхода. На выходе появляется сигнал в виде тока $I_{\text{ВЫХ}}$ или напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ на нагрузке $R_{\text{н}}$. Время от момента подачи сигнала на вход устройства до момента возникновения сигнала на выходе и является выдержкой времени.

Симметричный триггер (рис. 3.8, а) состоит из двух транзисторов $VT1$ и $VT2$, включенных по схеме с общим эмиттером. Резистор $R2$ ($R'2$) связывает коллектор одного транзистора с базой другого, образуя положительную обратную связь. Триггер имеет два входа S и R и два выхода — прямой Q и инверсный \bar{Q} (RS -триггер). Схема симметрична и триггер имеет два устойчивых состояния. Одно из них можно принять за 1, а другое — за 0. В одном из них транзистор $VT1$ открыт, а $VT2$ закрыт; в другом, наоборот, закрыт $VT1$ и открыт $VT2$. В каждом из состояний схема может находиться сколь угодно долго. Действительно, если в силу каких-либо причин открыт транзистор $VT1$, то его сопротивление мало, а коллектор и связанная с ним база транзистора $VT2$ практически имеют потенциал эмиттера. При равенстве потенциала эмиттера и базы $VT2$ находится практически в закрытом состоянии, на выходе — отрицательное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} \approx -E_{\text{к}}$, соответствующее сигналу, равному 1 ($Q = 1$).

В это время открытое состояние $VT1$ обеспечивается тем, что его база через обратную связь приобретает потенциал более низкий, чем потенциал эмиттера. При открытом $VT1$ выход \bar{Q} оказывается соединенным с нулевой шинкой, поэтому сигнал на выходе \bar{Q} отсутствует ($\bar{Q}=0$). Для того чтобы перевести триггер в другое устойчивое состояние, необходимо подать напряжение $U_{вх}$ (сигнал) положительной полярности на вход S (база транзистора $VT1$) или напряжение отрицательной полярности на вход R (база транзистора $VT2$). Для ускорения перехода триггера из одно-

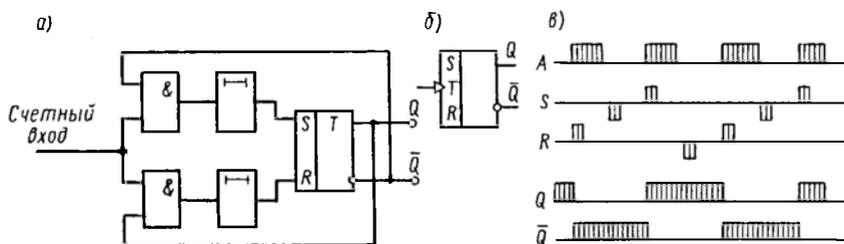


Рис. 3.9. Схема триггера со счетным входом (а), его условное обозначение (б) и временная диаграмма работы (в)

го состояния в другое параллельно резисторам $R2$ и $R'2$ включают конденсаторы (на рисунке не показаны).

Триггер со счетным входом. В устройствах релейной защиты и автоматики при обработке дискретной информации возникает необходимость производить подсчет импульсов. Для этой цели используют счетчики, выполненные на основе *триггера со счетным входом* (Т-триггер). Схема такого триггера содержит RS-триггер с объединенными входами S и R , в цепи которых включены разделительные диоды и элементы задержки сигналов. Благодаря этому импульсы поочередно поступают на входы S и R . Правильная работа триггера обеспечивается тем, что время задержки превышает длительность импульса. Указанные добавления в схему RS-триггера соответствуют его включению через логические элементы И и элементы задержки сигналов. С учетом этого на рис. 3.9, а показана функциональная схема триггера со счетным входом, а на рис. 3.9, б — его условное обозначение. Работу счетного триггера поясняет временная диаграмма (рис. 3.9, в). На счетный вход триггера подаются прямоугольные сигналы A . При изменении входного сигнала от нулевого значения к единичному на входах S и R поочередно появляются положительные импульсы. Если входной сигнал A изменяется от единичного значения к нулевому, то появляются импульсы противоположной полярности. Триггер переключается, если на его входы S и R подаются положительные импульсы. Таким образом, двум изменениям входного сигнала соответствует одно изменение вы-

ходного. Счетчик импульсов выполняется последовательным соединением триггеров со счетным входом.

На рис. 3.10, а показана схема четырехразрядного двоичного счетчика. Она собрана так, что передача 1 с предыдущего триггера на последующий происходит при переходе предыдущего триггера из состояния 1 в состояние 0. Работу счетчика поясняет временная диаграмма (рис. 3.10, б). Первый положительный импульс переводит триггер $T1$ в состояние 1 (происходит запись). Второй входной импульс считывает 1 с триггера $T1$ и записывает ее в триггер $T2$. Третий импульс снова переводит триггер $T1$ в состояние 1, а четвертый считывает 1 с $T1$ и $T2$ и записывает ее в $T3$. Таким образом, после четвертого импульса триггер $T3$ будет находиться в состоянии 1, а остальные триггеры — в состоянии 0. Для счетчика в целом это состояние 0100, что соответствует числу 4 в двоичной записи. Используются также реверсивные счетчики, осуществляющие счет импульсов как при суммировании, так и при вычитании. На основе триггеров выполняют

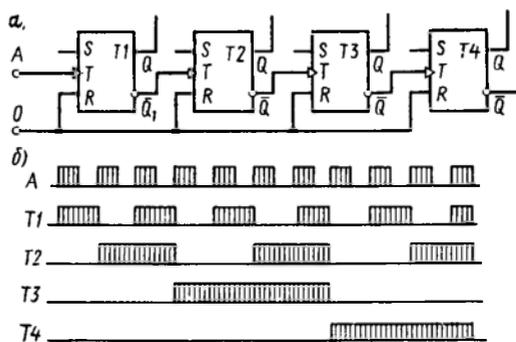


Рис. 3.10. Схема четырехразрядного двоичного счетчика (а) и временная диаграмма его работы (б)

не только счетчики, но и элементы памяти, формирователи и распределители импульсов, делители частоты, двухпозиционные логические реле в виде цифровых интегральных микросхем. Так, например, для счетчика импульсов в защите автоматического выключателя ВА-53 использована микросхема типа К561ИЕ9.

Одновибратор (рис. 3.11) отличается от симметричного триггера тем, что один из резисторов $R2$ обратной связи заменен конденсатором C и между базой и эмиттером транзистора $VT2$ включен резистор $R3$. Такая схема имеет одно устойчивое состояние, при котором $VT1$ открыт, а $VT2$ закрыт. Открытое состояние $VT1$ поддерживается за счет того, что его база, как и в схеме триггера, имеет более низкий, чем у эмиттера, потенциал. При этом конденсатор C закорочен малым сопротивлением открытого транзистора $VT1$ и находится в разряженном состоянии. Транзистор $VT2$ оказывается закрытым, так как его база, связанная с эмиттером резистором $R3$, имеет потенциал эмиттера.

Переход в новое неустойчивое состояние происходит, если подать на базу $VT1$ кратковременный положительный сигнал $U_{вх}$, закрывающий его. Конденсатор C начинает заряжаться. Открывается транзистор $VT2$, так как за счет за-

рядного тока конденсатора, проходящего через резистор $R3$, потенциал базы транзистора $VT2$ более низкий, чем потенциал его эмиттера. Это состояние неустойчиво. По мере заряда конденсатора потенциал базы $VT2$ возрастает, достигая после заряда конденсатора нулевого значения, при котором $VT2$ закрывается. При этом открывается транзистор $VT1$ и схема возвращается в исходное устойчивое состояние. Одновибратор можно использовать в качестве расширителя импульсов.

Мультивибратор можно использовать, например, в качестве генератора прямоугольных импульсов. В отличие от симметричного триггера в схеме мультивибратора вместо резисторов $R2$ и $R'2$ (см. рис. 3.8) включены конденсаторы $C1$ и $C2$ (рис. 3.12). Поэтому обратная связь между транзисторами $VT1$ и $VT2$ появ-

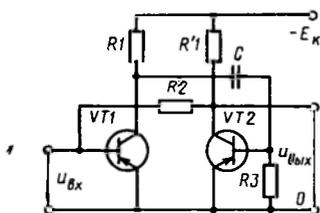


Рис. 3.11. Схема одновибратора

ляется только при заряде или разряде конденсаторов. Мультивибратор, как и триггер, имеет два устойчивых состояния, но переход из одного состояния в другое происходит без внешнего воздействия.

В зависимости от состояния транзисторов в процессе перезаряда конденсаторов потенциалы точек $K1$ и $K2$ изменяются от нуля (соответствующий транзистор открыт) до $-E_k$ (соответствующий транзистор закрыт), а потенциалы точек $B1$ и $B2$ — соответственно от $+E_k$ до нуля. В действительности при закрытом, например, транзисторе $VT1$ потенциал точки $K1$ равен $-E_k$, а потенциал точки $B2$ — нулю. Если $VT1$ открывается, то потенциал точки $K1$ становится равным нулю, т. е. получается приращение на $+E_k$. Напряжение на конденсаторе $C1$ мгновенно измениться не может, поэтому потенциал точки $B2$ получает такое же приращение и становится равным $+E_k$.

Мультивибратор действует следующим образом. Если открывается транзистор $VT1$, то точки $K1$ и $B1$ принимают нулевые потенциалы; потенциал точки $B2$ изменяется от $+E_k$ до нуля (конденсатор $C1$ разряжается), а потенциал $K2$ изменяется от нуля до $-E_k$ (конденсатор $C2$ заряжается). Когда потенциал $B2$ снизится до нуля, транзистор $VT2$ открывается и поэтому потенциал точки $K2$ становится равным нулю, а точки $B1$ — равным $+E_k$ (конденсатор $C2$ разряжается), транзистор $VT1$ закрывается. При этом потенциал точки $K1$ изменяется от нуля до $-E_k$ (конденсатор $C1$ заряжается). Когда потенциал точки $B1$ снизится до нуля, транзистор $VT1$ открывается. Таким образом, транзисторы $VT1$ и $VT2$ попеременно открываются и закрываются, создавая на выходе мультивибратора импульсы $U_{ВЫХ}$, близкие к прямоугольным. При равенстве R и C в цепях транзисторов продолжительности импульса t_n и паузы t_p равны между собой. Изменяя R и C , можно изменять отношение t_n/t_p .

Блокнинг-генератор в устройствах релейной защиты и автоматики применяется для получения кратковременных импульсов. Он может работать как в режиме потороннего запуска (ждущий режим), так и в режиме автоколебаний. Упрощенная схема блокнинг-генератора, работающего в режиме автоколебаний, показана на рис. 3.13. В коллекторную цепь транзистора включена первичная обмотка трансформатора TL . Через одну из его вторичных обмоток осуществлена положительная обратная связь между коллекторной и базовой цепями. Другая вторичная обмотка трансформатора является выходом генератора.

Работу схемы в режиме автоколебаний упрощенно можно объяснить следующим образом. Благодаря обратной связи транзистор попеременно то открывается, то закрывается. В процессе его открывания напряжением обратной связи $u_{об.с}$ конденсатор C заряжается и на выходе генератора (резистор R_n) появляется импульсное напряжение $u_{вых}$ (сигнал). Когда транзистор закрыт, сигнала нет и происходит разряд конденсатора через вторичную обмотку трансформатора и резистор R . По мере разряда положительное напряжение на базе убывает и в тот момент, когда оно становится примерно равным нулю, транзистор начинает открываться. Изменяющийся ток коллекторной цепи обуславливает появление ЭДС во вторичных обмотках трансформатора TL . Конденсатор

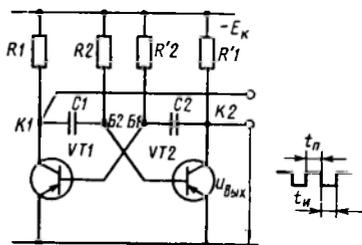


Рис. 3.12. Схема мультивибратора

Для обеспечения работы в ждущем режиме в цепь эмиттер—база транзистора вводится источник положительного смещения. При этом блокинг-генератор запускается отрицательным напряжением (сигналом), подводимым к базе транзистора. Ждущий режим можно создать и воздействием на цепь эмиттера.

Магнитодиодная ячейка содержит диоды и ферромагнитные элементы. Основой ферромагнитных элементов является ферритовый сердечник с близкой к прямоугольной петлей перемагничивания (гистерезиса). Свойства таких магнитных материалов уже описаны (см. § 1.3). После перемагничивания они могут долго находиться в одном из двух состояний, соответствующих положительному $+B_s$ или отрицательному $-B_s$ значению магнитной индукции насыщения. Первое состояние принято обозначать логической единицей (1), а второе — нулем (0). Магнитный элемент имеет две, три обмотки и более. На рис. 3.14 схематически изображен элемент с тремя обмотками: обмоткой записи $\omega_{зп}$, обмоткой считывания $\omega_{сч}$ и выходной обмоткой $\omega_{вых}$. Он может работать в режиме управляемого реактора или в трансформаторном режиме.

Передача сигнала в выходную обмотку происходит следующим образом. Информация в виде импульса тока определенной полярности поступает в обмотку $\omega_{зп}$. При этом магнитное состояние сердечника изменится только в том случае, если созданная током магнитная индукция противоположна по знаку остаточной магнитной индукции. Если сердечник находится, например, в состоянии 0, то переход его в состояние 1 происходит при подаче в обмотку положительного импульса тока. Это состояние магнитный элемент сохранит и после исчезновения импульса тока. Для перехода его в состояние 0 необходимо в обмотку $\omega_{зп}$ подать отрицательный импульс тока. Таким образом, магнитный элемент через обмотку $\omega_{зп}$ запоминает полярность импульса, который его перемагничивает до положительной индукции $+B_s$. Сигнал в выходной обмотке $\omega_{вых}$, соответствующий 1, появляется при подаче в обмотку считывания импульса тока,

создающего отрицательную индукцию $-B_s$ в сердечнике. Если до этого сердечник находился в состоянии 1 (намагничен до $+B_s$), то происходит его перемангничивание до $-B_s$ и в обмотке $w_{вых}$ появляется относительно большая ЭДС (сигнал). Если же сердечник находился в состоянии 0 (намагничен до $-B_s$), то перемангничивания не происходит и ЭДС незначительна (помеха).

Единичные ферромагнитные элементы, состоящие из одного сердечника, в схемах соединяются в ячейки. При этом для переда-

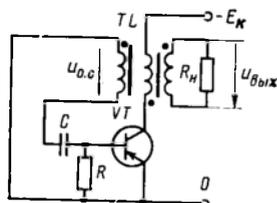


Рис. 3.13. Схема блокинг-генератора

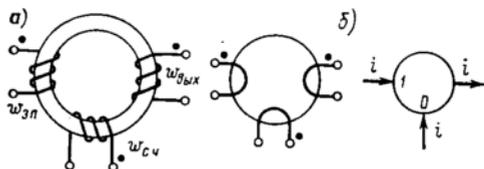


Рис. 3.14. Схема ферромагнитного элемента (а) и его условное изображение (б)

чи сигнала 1 или 0 от одного сердечника к другому выходная обмотка предыдущего сердечника подключается к обмотке записи последующего сердечника. При таком соединении возможно появление ложной обратной информации, так как при изменении магнитного состояния сердечника наводятся ЭДС во всех его обмот-

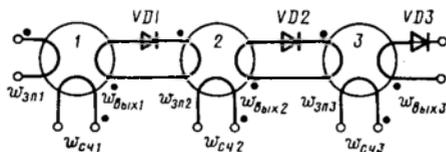


Рис. 3.15. Магнитодиодная ячейка

ках. Действительно, при подаче в обмотку записи $w_{зп}$ сердечника 1 (рис. 3.15) положительного (намагничивающего) импульса тока, входящего в обозначенное точкой начало обмотки $w_{зп}$ и перемангнивающего сердечник из состояния 0 в состояние 1, в его выходной обмотке $w_{вых1}$ наводится ЭДС. Если обмотка замкнута, то возникает ток, выходящий из ее начала и стремящийся вернуть сердечник в состояние 0, и запись не получается. Для предотвращения указанного возникновения тока в цепь выходной обмотки сердечника 1 включают диод $VD1$. Той же цели служат диоды $VD2$ и $VD3$ в цепях выходных обмоток последующих сердечников.

Для передачи информации от сердечника 1 к сердечнику 2 в обмотку $w_{сч1}$ сердечника 1 подается отрицательный (размагничивающий) импульс тока, входящего в конец обмотки. При перемангнивании сердечника в его обмотке $w_{вых1}$ наводится ЭДС, противоположная указанной выше полярности, и диод $VD1$ открывается. Проходящий в цепи обмотки $w_{зп2}$ сердечника 2 ток переводит сердечник 2 в состояние 1 (записывает единицу). Если теперь подать размагничивающий импульс тока в обмотку $w_{сч2}$ сердечника 2, то записанная единица передается сердечнику 3. Однако в процессе перемангнивания сердечника 2

возникает также ЭДС в его обмотке $\omega_{\text{эл2}}$. Для этой ЭДС диод $VD1$ оказывается открытым. Чтобы исключить ненужное перемагничивание сердечника 1, одновременно с подачей тока в обмотку $\omega_{\text{сч2}}$ сердечника 2 подают размагничивающий ток в обмотку $\omega_{\text{сч1}}$ сердечника 1.

Рассмотренная ячейка состоит из ферритовых сердечников и диодов, поэтому называется *магнитодиодной*. Она может быть использована, в частности, в распределителях импульсов. Находят также применение *магнитотранзисторные ячейки*, объединяющие ферромагнитные элементы и транзисторы.

§ 3.3. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ И МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

Полупроводниковые измерительные релс, как и электромеханические, осуществляют сравнение воздействующих величин по их абсолютному значению и по фазе. Эти функции у них выполняют специальные полупроводниковые элементы — *схемы сравнения*. В процессе сравнения они преобразуют непрерывные величины на входе в дискретную величину на выходе. Это обычно постоянный ток или постоянное напряжение, имеющие два значения, которые различаются знаком. Исполнительной частью схемы сравнения является нуль-орган. Под схемой сравнения часто понимают и сравнивающую и исполнительную части реле. Для выполнения схемы сравнения используют диоды, триоды, выпрямители, поляризованные и магнитоэлектрические реле, а также транзисторные и операционные усилители. Все эти элементы, исключая транзисторные и операционные усилители, рассмотрены выше. Поэтому изучение схем сравнения начнем с рассмотрения транзисторных и операционных усилителей.

Двухкаскадный усилитель в релейном режиме (рис. 3.16). В устройствах релейной защиты и автоматики усилитель используется в качестве нуль-органа схем сравнения. Он отличается от триггера (рис. 3.8) тем, что при отсутствии сигнала на входе транзистор $VT1$ открыт, так как потенциал его базы относительно эмиттера отрицателен благодаря цепи с резистором $R3$, а транзистор $VT2$ закрыт. Усилитель приходит в действие при подаче на его вход положительного напряжения $U_{\text{вх}}$ (сигнала), которое должно быть достаточным для закрытия транзистора $VT1$. При этом транзистор $VT2$ открывается. В таком состоянии схема находится до тех пор, пока входной сигнал не будет снят или входное напряжение не уменьшится до некоторого значения. Ток в коллекторной цепи транзистора $VT2$ изменяется скачкообразно от минимального до максимального значений благодаря положительной обратной связи, обеспечивающей релейное действие усилителя аналогично электромеханическому реле.

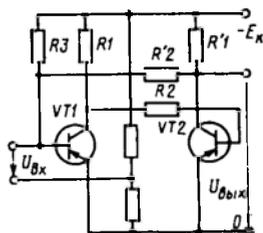


Рис. 3.16. Схема усилителя, работающего в релейном режиме

Операционные усилители постоянного тока. Они представляют собой сложное полупроводниковое устройство, в состав которого входят несколько транзисторных каскадов усиления напряжения, выходной каскад усиления тока и цепи согласования каскадов между собой. Операционный усилитель (ОУ) имеет два основных входа и один выход. Для питания ОУ имеются еще два входа, которые подключаются к двум источникам питания противоположной полярности $+E_n$ и $-E_n$ с общей нулевой шинкой 0 (рис.

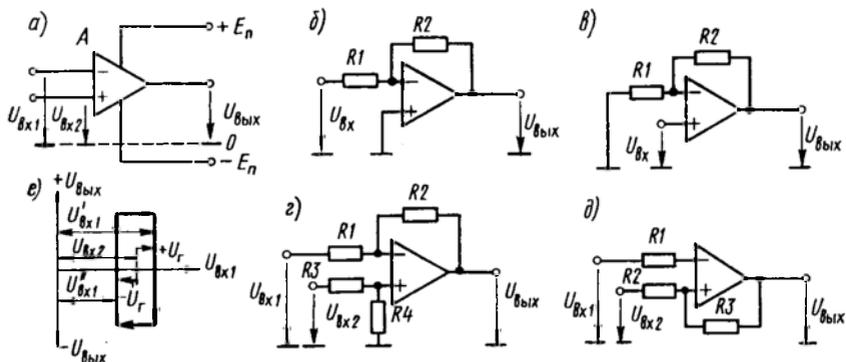


Рис. 3.17. Операционный усилитель постоянного тока и схемы его включения

3.17, а). Один из основных входов называется *инвертирующим* (сокращенно И-вход), а другой — *неинвертирующим* (сокращенно Н-вход). Первый обозначается знаком «—», а второй — знаком «+». Входные напряжения, подводимые к инвертирующему $U_{вх1}$ и к неинвертирующему $U_{вх2}$ входам, и выходное напряжение $U_{вых}$ отсчитываются от нулевой шинки. Операционный усилитель характеризуется коэффициентом усиления K , под которым понимаем отношение изменения выходного напряжения $\Delta U_{вых}$ к вызвавшему его изменению входного напряжения $\Delta U_{вх}$ при работе ОУ на линейном участке характеристики ($K=10^3 \dots 10^6$). Операционный усилитель имеет большое входное сопротивление $R_{вх}$ и малый входной ток. Сопротивление $R_{вх}$ может составлять 10^3 — 10^6 Ом и более, а входной ток — 10^{-6} — 10^{-7} А. Выходное сопротивление ОУ $R_{вых}$ относительно мало, оно лежит в диапазоне от нескольких десятков до нескольких сотен Ом. Мощность, потребляемая ОУ, не превышает 0,2 Вт. Операционный усилитель может работать в двух режимах: линейном и ключевом. В линейном режиме напряжение $U_{вых}$ связано с напряжением $U_{вх}$ некоторой непрерывной зависимостью, а в ключевом оно принимает два определенных значения, сменяющиеся в зависимости от соотношений входных напряжений $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$. Работа ОУ в том или другом режиме определяется схемой его включения [10, 20]. Рассмотрим некоторые из них.

Инвертирующий усилитель. Для получения инвертирующего усилителя необходимо Н-вход соединить с общей нулевой шинкой, на И-вход включить резистор $R1$ и соединить выход ОУ с И-входом отрицательной обратной связью (ООС) в виде резистора $R2$ (рис. 3.17, б). Отрицательная обратная связь обеспечивает работу ОУ в линейном режиме. В такой схеме включения ОУ напряжение $U_{вх}$ подается на И-вход, при этом напряжение $U_{вых}$ на выходе будет изменяться с изменением напряжения $U_{вх}$, но знаки напряжений будут различными. Так, если на И-вход подать отрицательное напряжение, то напряжение на выходе будет положительным, и наоборот. На вход инвертирующего усилителя можно подавать несколько напряжений. Это, в частности, позволяет выполнять на его основе фильтры симметричных составляющих.

Неинвертирующий усилитель получается из инвертирующего, если И-вход соединить с общей нулевой шинкой, а напряжение $U_{вх}$ подавать на Н-вход (рис. 3.17, в). При этом напряжение на выходе $U_{вых}$ имеет одинаковый знак с напряжением $U_{вх}$ и изменяется вместе с ним.

Дифференциальный усилитель. Схема простейшего дифференциального усилителя показана на рис. 3.17, г. При равенстве коэффициентов усиления по И-входу и Н-входу напряжение на выходе $U_{вых}$ пропорционально разности входных напряжений $U_{вых} = (U_{вх2} - U_{вх1})K$, а его знак определяется абсолютными значениями и знаками этих напряжений.

Компаратор. Схема компаратора (рис. 3.17, д) не содержит отрицательной обратной связи, поэтому ОУ работает в ключевом режиме при подаче на его входы напряжений одного знака. Так, при положительных $U_{вх1}$ и $U_{вх2}$ на выходе компаратора имеется максимальное положительное напряжение, если $U_{вх2} > U_{вх1}$, или максимальное отрицательное, если $U_{вх2} < U_{вх1}$. Таким образом, компаратор сравнивает входные напряжения и переключается всякий раз при изменении знака разности сравниваемых напряжений. Входные напряжения могут содержать помехи, мешающие четкому переключению компаратора. Для обеспечения устойчивой работы в схему вводят положительную обратную связь через резистор $R3$. Благодаря этому с выхода компаратора на Н-вход подается так называемое напряжение гистерезиса U_r , пропорциональное напряжению $U_{вых}$ и одинакового с ним знака. Поэтому при положительном $U_{вх2}$ напряжение на Н-входе равно $U_{вх2}^* = (U_{вх2} + U_r)$, а при отрицательном $U_{вх2}^* = (U_{вх2} - U_r)$. На рис. 3.17, е показана характеристика компаратора при неизменном напряжении $U_{вх2}$. По аналогии с электромеханическим реле можно считать, что при $U_{вх1}^* \geq (U_{вх2} + U_r)$ компаратор срабатывает, а при $U_{вх1}^* \leq (U_{вх2} - U_r)$ — возвращается в исходное состояние. Такая схема включения ОУ иногда называется триггером

Шмитта. Она широко используется в полупроводниковых реле в качестве порогового элемента.

Нуль-орган. Компаратор без положительной обратной связи превращается в нуль-орган, если один из его входов, например H , соединить с общей нулевой шинкой. При этом напряжение $U_{вх1}$ сравнивается с напряжением $U_{вх2}=0$. Так как компаратор переключается в связи с изменением знака разности сравниваемых напряжений, то для переключения нуль-органа необходимо изменить знак напряжения $U_{вх1}$.

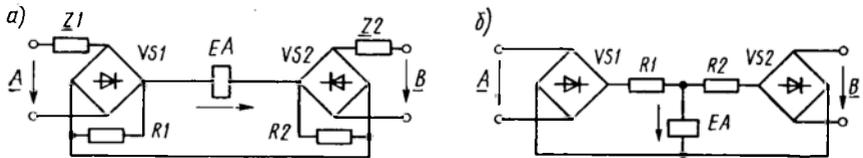


Рис. 3.18. Схемы сравнения абсолютных значений электрических величин:

а — на равновесие напряжений; б — на циркуляцию токов

Схемы сравнения абсолютных значений двух электрических величин. Они состоят из двух выпрямителей $VS1$ и $VS2$, выпрямляющих сравниваемые величины \underline{A} и \underline{B} , и исполнительной части — нуль-органа EA . В зависимости от способа соединения выходов выпрямителей между собой и с исполнительной частью различают *схемы на равновесие напряжений* (рис. 3.18, а) и *схемы на циркуляцию токов* (рис. 3.18, б). Как в той, так и в другой схеме в зависимости от соотношения \underline{A} и \underline{B} направление постоянной составляющей тока в нуль-органе может измениться на противоположное. При $|\underline{A}| > |\underline{B}|$ ток имеет одно направление — положительное, показанное на рис. 3.18, а при $|\underline{A}| < |\underline{B}|$ — отрицательное. Изменение направления тока используется для действия нуль-органа. Для этого он должен обладать направленностью действия, т. е. срабатывать при одном определенном направлении тока (полярности сигнала), например положительном ($|\underline{A}| > |\underline{B}|$), и определенном его значении. Режим работы выпрямителей такой, что при малых значениях \underline{B} ток в нуль-органе зависит только от \underline{A} , а при больших значениях \underline{B} он пропорционален разности $|\underline{A}| - |\underline{B}|$. В первом случае нуль-орган срабатывает при определенном значении \underline{A} , а во втором — при определенном постоянном значении разности $|\underline{A}| - |\underline{B}|$.

В качестве аналога схемы сравнения можно использовать инвертирующий операционный усилитель, так как на его вход можно подавать несколько напряжений. При этом напряжение на выходе ОУ будет пропорционально алгебраической сумме мгновенных значений подведенных напряжений. Суммирующий усилитель

широко используется в схемах полупроводниковых измерительных реле.

Схема сравнения абсолютного значения одной величины с заданным значением является частным случаем рассмотренных схем сравнения. Одна из таких схем показана на рис. 3.19. Она представляет собой нелинейный мост из потенциометра $R1-R2$, резистора $R3$ и стабилитрона VD . На вход моста подается предварительно выпрямленное напряжение $U_{вх}$. Здесь в качестве заданной величины использовано напряжение стабилитрона $U_{ст}$. С ним сравнивается напряжение на выходе потенциометра U_1 , пропорциональное напряжению $U_{вх}$, $U_1 = [U_{вх} R_2 / (R_1 + R_2)]$. Нуль-орган EA срабатывает, если $U_1 \geq U_{ст}$, т. е. $U_{с.р} = (R_1 + R_2) U_{ст} / R_2$. Если сравнивают абсолютные значения переменных величин, например тока, то в схеме сравнения может быть использован туннельный диод (рис. 3.20, а). На вход схемы подается переменный ток i (рис. 3.20, б). Он сравнивается с заданным значением $I_{зд}$, определяемым туннельным диодом VD . В соответствии с характеристикой диода (рис. 3.4) при $i = I_{зд}$ происходит скачкообразное увеличение

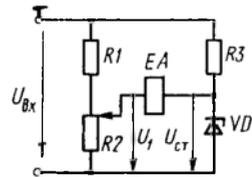


Рис. 3.19. Схема сравнения абсолютного значения одной электрической величины с заданным значением

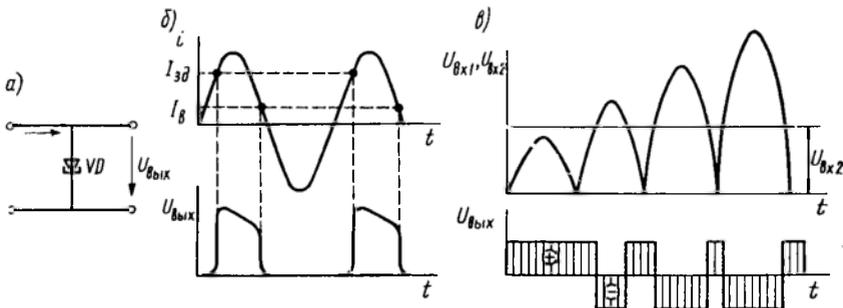


Рис. 3.20. Сравнения абсолютного значения одной электрической величины с заданным значением с помощью туннельного диода (а, б) и операционного усилителя (в)

ние, а при $i = I_{в}$ — скачкообразное уменьшение мгновенного значения напряжения $U_{вых}$ на выходе схемы. На этой основе можно выполнить измерительное реле с одной воздействующей величиной. Для этой же цели используют операционные усилители, включенные по схеме компаратора. Входное выпрямленное напряжение $U_{вх1}$ подается на инвертирующий вход. Оно сравнивается с заданным (опорным) напряжением $U_{вх2}$ неинвертирующего входа. При этом продолжительность сигнала определенной полярно-

сти на выходе ($U_{\text{вых}}$) при заданном $U_{\text{вх2}}$ зависит от амплитуды напряжения $U_{\text{вх1}}$ (рис. 3.20, в). Эта зависимость используется, например, у реле тока РСТ-11—РСТ-14 и у реле напряжения РСН-14—РСН-17.

Схемы сравнения двух электрических величин по фазе. Сравнить две величины по фазе можно путем определения доли полупериода, в течение которой мгновенные значения сравниваемых величин совпадают по знаку. Так, если две величины совпадают по фазе, то знаки их мгновенных значений одинаковы в течение всего полупериода. С увеличением расхождения по фазе доля по-

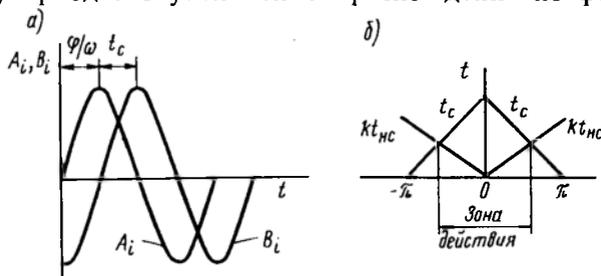


Рис. 3.21. Графики, иллюстрирующие сравнение двух электрических величин по фазе

лупериода, в течение которой знаки величин совпадают, уменьшается и при расхождении их по фазе на угол π равна нулю. На рис. 3.21, а показано изменение двух синусоидальных величин A и B , причем B отстает от A на угол φ , который определяет время совпадения

$$t_c = (T/2)(1 - |\varphi|/\pi). \quad (3.1)$$

Устройство можно выполнить таким образом, что оно будет действовать в том случае, когда время совпадения t_c сравняется с временем несовпадения $t_{\text{нс}}$ или будет больше него: $t_c \geq t_{\text{нс}}$. Время $t_{\text{нс}}$ определяется как

$$t_{\text{нс}} = T/2 - t_c = [T/(2\pi)] |\varphi|. \quad (3.2)$$

На рис. 3.21, б приведены зависимости $t_c = f|\varphi|$ и $kt_{\text{нс}} = f|\varphi|$, где k — постоянный коэффициент. Точки пересечения этих характеристик определяют зону, в которой удовлетворяется условие срабатывания реле, т. е. $t_c \geq kt_{\text{нс}}$, или с учетом (3.1) и (3.2) $(T/2)(1 - |\varphi|/\pi) \geq k[T/(2\pi)]|\varphi|$. Отсюда $|\varphi| \leq \pi/(k+1)$ или

$$-\pi/(k+1) \leq \varphi \leq \pi/(k+1).$$

При $k=1$ выражение принимает вид

$$-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2. \quad (3.3)$$

Изложенный принцип сравнения двух величин по фазе можно реализовать с помощью кольцевого фазочувствитель-

ного выпрямителя. Его схема (рис. 3.22, а) состоит из четырех диодов $VD1—VD4$. В цепь диодов включены резисторы R равного сопротивления. Нуль-орган EA подключается к средним точкам делителей напряжения $R1$ и $R2$. Положительные направления сравниваемых величин A_i и B_i и тока в нуль-оргane EA показаны стрелками. Работа схемы подробно рассмотрена в [7]. Состояние диодов схемы определяется большей из сравниваемых ве-

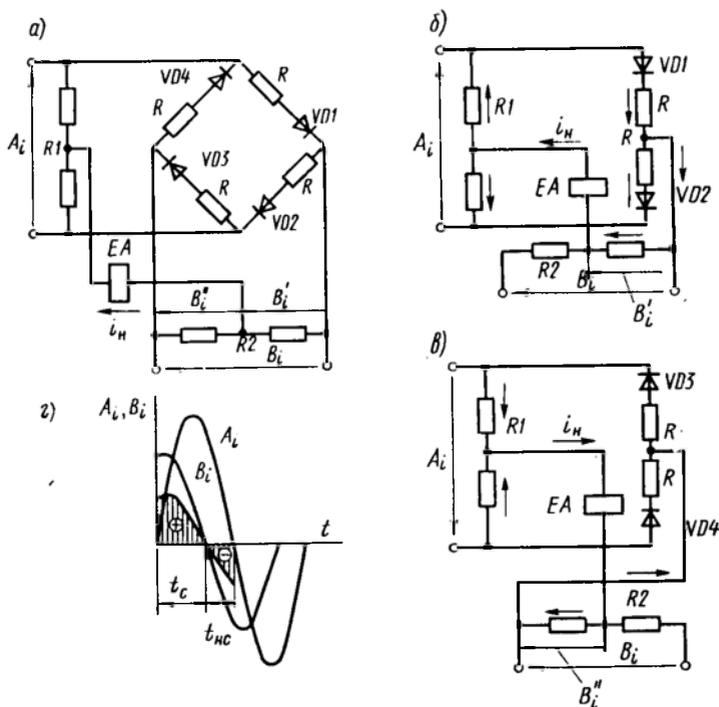


Рис. 3.22. Кольцевой фазочувствительный выпрямитель

личин. Так, если $A_i > B_i$, то при положительном направлении A_i открыты диоды $VD1$ и $VD2$ и закрыты диоды $VD3$ и $VD4$, а при отрицательном наоборот — открыты диоды $VD3$ и $VD4$ и закрыты $VD1$ и $VD2$. При этом ток в EA проходит под воздействием меньшей величины B_i , а его направление зависит от знака сравниваемых величин. Если, например, B_i имеет положительный знак, то при положительном направлении A_i ток в реле EA тоже положителен (рис. 3.22, б), а при отрицательном направлении A_i ток в реле EA меняет направление (рис. 3.22, в). Можно показать, что при любых соотношениях между знаками сравниваемых величин ток в EA имеет положительное направление, если знаки мгновен-

ных значений сравниваемых величин одинаковы, и отрицательное направление, если знаки мгновенных значений разные. При этом среднее значение тока в EA характеризуется разностью площадей, ограниченных положительными и отрицательными значениями тока i_n и осью времени. Эти площади определяются временем совпадения t_c и временем несовпадения t_{nc} (рис. 3.22, z). Поэтому

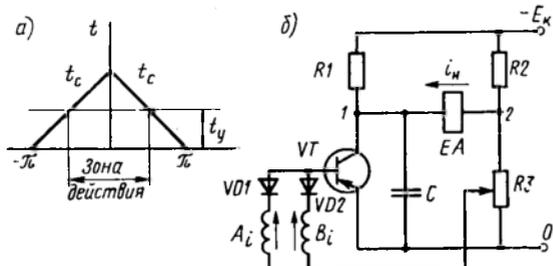


Рис. 3.23. График, иллюстрирующий сравнение двух электрических величин по фазе (а), и схема сравнения (б)

при $t_c > t_{nc}$ знак среднего значения тока положительный, а при $t_c < t_{nc}$ — отрицательный. Таким образом, схема кольцевого фазочувствительного выпрямителя удовлетворяет условию (3.3). В устройствах релейной защиты применяются также

схемы сравнения двух величин по фазе, у которых время совпадения t_c сравнивается с некоторым заданным временем t_y (рис. 3.23, а). Нуль-орган схемы сравнения срабатывает, если $t_c > t_y$. С учетом (3.1) найдем

$$|\varphi| \leq \pi(1 - 2t_y/T)$$

или

$$-\pi(1 - 2tg/T) \leq \varphi \leq \pi(1 - 2t_y/T). \quad (3.4)$$

В частном случае при $t_y = T/4$ условие (3.4) принимает вид $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$. Оно соответствует условию (3.3).

Одна из схем, осуществляющая сравнения времени совпадения t_c положительных мгновенных значений величин A_i и B_i с заданным временем t_y , показана на рис. 3.23, б. Схема состоит из четырехплечего моста, содержащего резисторы $R1, R2, R3$, и параллельно соединенных транзистора VT и конденсатора C . При закрытом транзисторе конденсатор заряжается, а при открытом — разряжается. Переключение транзистора из одного состояния в другое происходит в зависимости от знака сравниваемых величин A_i и B_i . Если хотя бы одна из этих величин отрицательна (имеет направление, противоположное направлению, указанному стрелками), то открывается соответствующий диод, а за ним открывается и транзистор. При этом потенциал точки 1 становится близким к нулю, т. е. выше потенциала точки 2, и ток в EA направляется от точки 1 к точке 2 против направления, указанного стрелкой. Этот режим определяется временем несовпадения t_{nc} , поэтому нуль-орган работать не должен. Транзистор закрывается, если обе сравниваемые величины положительны и диоды $VD1$ и $VD2$

закрываются. В закрытом состоянии он находится в течение времени совпадения t_c положительных мгновенных значений A_i и B_i . При этом конденсатор C заряжается и потенциал точки 1 понижается. По истечении заданного времени t_y он станет ниже потенциала точки 2 и направление тока в EA совпадет с положительным направлением, указанным стрелкой. Это произойдет только в том случае, если время совпадения t_c превзойдет заданное время t_y . В этом случае нуль-орган срабатывает.

§ 3.4. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ С ОДНОЙ ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ВЕЛИЧИНОЙ

Для выполнения реле используют рассмотренные выше (см. § 3.3) полупроводниковые элементы измерительных органов. К реле с одной электрической величиной относятся реле тока KA , реле напряжения KV и реле частоты KF . У реле тока действующей величиной является ток; его предварительно преобразовывают в напряжение. В остальном реле тока и реле напряжения мало чем отличаются.

Реле тока на основе одновибратора. На рис. 3.24 показана схема измерительного реле тока на основе одновибратора, выполненного на транзисторах $VT1$ и $VT2$ разной проводимости. В цепь выхода реле включен транзистор $VT3$. В нормальном режиме, пока амплитуда входного напряжения $U_{вх}$ ниже напряжения пробоя стабилитрона VD , все транзисторы находятся в закрытом состоянии, конденсатор C разряжен, напряжение на выходе реле отсутствует. Реле срабатывает, если амплитуда входного напряжения превышает напряжение пробоя стабилитрона. При этом на базу транзистора $VT1$ подается открывающий отрицательный потенциал. Одновременно с $VT1$ открываются транзисторы $VT2$ и $VT3$, на выходе реле появляется сигнал, а через открытый $VT1$ создается цепь заряда конденсатора C . По мере его заряда потенциал базы $VT2$ повышается, что ведет к его закрытию. Если к этому моменту сигнал на входе реле исчезает, то закрывается и $VT1$. При этом цепь заряда конденсатора размыкается и конденсатор начинает разряжаться через эмиттерный переход транзистора $VT3$ и резисторы $R1$ и $R2$. В связи с этим $VT3$ продолжает оставаться открытым до тех пор, пока напряжение на конденсаторе не уменьшится почти до нуля.

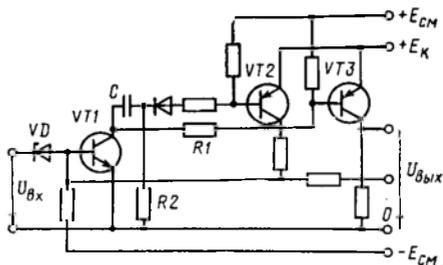


Рис. 3.24. Схема реле тока на основе одновибратора

Параметры схемы выбирают так, чтобы время от начала заряда конденсатора до момента закрытия транзистора $VT3$ было больше периода повторения входных импульсов. При этом на выходе реле получают дискретный потенциальный сигнал $U_{вых}$. Реле возвращается в начальное состояние только при снижении амплитуды входного напряжения ниже напряжения пробоя стабилитрона. Коэффициент возврата реле близок к единице.

Реле тока серии РСТ-14. На рис. 3.25, а показана упрощенная схема, положенная в основу реле. Она используется также для

выполнения реле напряжения серии РСН-14—РСН-17. Основными элементами схемы являются операционные усилители $A1$ и $A2$, конденсатор C и стабилитрон $VD2$. Операционный усилитель $A1$ включен по схеме компаратора. На его инвертирующий вход подается входное выпрямленное напряжение $U_{A1, \text{вх}1}$. Оно сравнивается с заданным напряжением $U_{A1, \text{вх}2}$ на неинвертирующем входе.

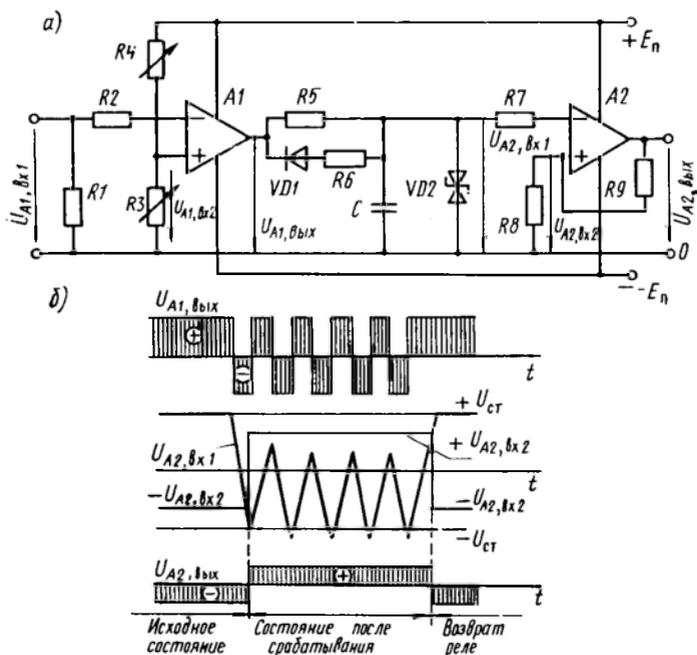


Рис. 3.25. Схема реле тока серии РСТ-14 (а) и временные диаграммы, поясняющие его работу (б)

В зависимости от соотношения между этими напряжениями на выходе $A1$ появляются положительные или отрицательные импульсы напряжения $U_{A1, \text{вых}}$ (см. 3.20, в). Это напряжение обуславливает заряд конденсатора C . В первом случае ток заряда проходит по резистору $R5$, а напряжение на конденсаторе возрастает и стремится к максимальному положительному значению ($+U_{CT}$). При отрицательном $U_{A1, \text{вых}}$ открывается диод $VD1$ и ток заряда конденсатора C не только меняет направление, но и благодаря параллельному включению резисторов $R5$ и $R6$ возрастает, а напряжение на конденсаторе стремится к наибольшему отрицательному значению ($-U_{CT}$). Максимальные значения напряжения на конденсаторе ограничиваются стабилитроном $VD2$. Таким образом, напряжение на конденсаторе в процессе его перезаряда имеет пи-

лообразный характер. Оно подается на инвертирующий вход усилителя A_2 , включенного по схеме триггера Шмитта, и сравнивается с заданным напряжением неинвертирующего входа $U_{A_2 \text{ вх } 2}$. Напряжение на выходе A_2 $U_{A_2 \text{ вых}}$ может быть как положительным, так и отрицательным в зависимости от знаков и абсолютных значений сравниваемых напряжений. Благодаря положительной обратной связи в виде резистора R_9 напряжение $U_{A_2 \text{ вх } 2}$ будет од-ного знака с напряжением $U_{A_2 \text{ вых}}$.

Реле работает следующим образом. В нормальном режиме амплитудное значение входного выпрямленного напряжения $U_{A_1 \text{ вх } 1}$ меньше, чем заданное напряжение $U_{A_1 \text{ вх } 2}$ усилителя A_1 , поэтому напряжение на выходе усилителя A_1 $U_{A_1 \text{ вых}}$ имеет наибольшее положительное значение и конденсатор C заряжается до максимального положительного напряжения ($+U_{\text{ст}}$). Оно подается на инвертирующий вход усилителя A_2 , т. е. $U_{A_2 \text{ вх } 1} = +U_{\text{ст}}$ (рис. 3.25, б). Напряжение $U_{A_2 \text{ вх } 1}$ больше заданного напряжения $U_{A_2 \text{ вх } 2}$ неинвертирующего входа усилителя A_2 , поэтому на выходе усилителя максимальное отрицательное напряжение $-U_{A_2 \text{ вых}}$. При этом $U_{A_2 \text{ вх } 2}$ тоже отрицательное. Это соответствует исходному состоянию реле. Очевидно, состоянию после срабатывания должно соответствовать максимальное положительное напряжение на выходе A_2 . Для этого необходимо переключить операционный усилитель A_2 , что произойдет при коротких замыканиях, когда на его инвертирующий вход будет подано отрицательное напряжение, достигшее значения $-U_{A_2 \text{ вх } 2}$. В самом деле, при возникновении повреждения амплитуда выпрямленного входного напряжения $U_{A_1 \text{ вх } 1}$ превысит заданное входное напряжение $U_{A_1 \text{ вх } 2}$ и на выходе усилитель A_1 появится прямоугольный импульс максимального отрицательного напряжения (см. рис. 3.20, в). Конденсатор C начнет перезаряжаться. Когда напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на инвертирующем входе $U_{A_2 \text{ вх } 1}$ усилителя A_2 достигнет значения отрицательного напряжения $U_{A_2 \text{ вх } 2}$, усилитель переключится и на его выходе появится максимальное положительное напряжение $U_{A_2 \text{ вых}}$. Вместе с ним изменятся знак и напряжение $U_{A_2 \text{ вх } 2}$. Последующие положительные и отрицательные импульсы напряжения $U_{A_1 \text{ вых}}$ будут перезаряжать конденсатор, однако при этом напряжение $U_{A_2 \text{ вх } 1}$ не достигает значения $+U_{A_2 \text{ вх } 2}$ и усилитель A_2 остается в состоянии после срабатывания. В таком состоянии он находится до тех пор, пока на усилителе A_1 входное напряжение $U_{A_1 \text{ вх } 1}$ будет превышать заданное входное напряжение $U_{A_1 \text{ вх } 2}$.

Реле тока с зависимой выдержкой времени. На автоматических выключателях серии ВА-50 устанавливаются блоки полупроводниковой токовой защиты, содержащие три измерительных реле: от перегрузки с зависимой выдержкой времени, от междофазных коротких замыканий и от коротких замыканий на землю. Реле выполнены на основе интегральных микросхем. В качестве примера

рассмотрим схему реле от токов перегрузки (рис. 3.26). Сравнивающая часть электрического реле выполнена на операционном усилителе A , включенном по схеме инвертирующего усилителя. Для создания выдержки времени использован счетчик импульсов, состоящий из двух микросхем $D1$ и $D2$ типа К561ИЕ9 и К561ИЕ10. Спусковое устройство собрано на транзисторах $VT1$ — $VT3$. На инвертирующий вход усилителя A через резистор $R3$ поступает выпрямленное входное напряжение $U_{вх}$, пропорциональное контролируемому току. На этот же вход через резистор $R4$ подается опорное отрицательное напряжение от источника — $E_{п}$.

В исходном состоянии реле значение положительного входного напряжения $U_{вх}$ меньше значения отрицательного опорного напряжения, поэтому напряжение на выходе усилителя имеет положительную полярность. В этом случае диод $VD3$ закрыт, а диод $VD4$ открыт; цепь конденсатора $C1$ разомкнута и конденсатор не заряжен, а цепь положительной обратной связи, состоящей из резистора $R6$, замкнута и на неинвертирующий вход усилителя A подано положительное напряжение. Одновременно через открытый диод $VD4$ и резистор $R11$ положительный потенциал подан также на вход «сброс» микросхем $D1$ и $D2$ счетчика импульсов. При этом на выходе счетчика устанавливается логический нуль. В исходном состоянии реле транзисторы $VT1$ и $VT2$ закрыты, а транзистор $VT3$ открыт. Через открытый транзистор $VT3$ и резисторы $R9$ и $R10$ отрицательный потенциал подается на вход «запись» (счетный вход) микросхемы $D1$. Для пуска счетчика необходимо с входов установки нуля (сброс) $D1$ и $D2$ снять положительный потенциал, а на вход «запись» $D1$ подать положительное напряжение. Это произойдет вследствие переключения усилителя A в процессе срабатывания реле.

В самом деле, при некотором значении $U_{вх}$, соответствующем току срабатывания, напряжение на инвертирующем входе усилителя A станет положительным и превысит значение напряжения на неинвертирующем входе. Усилитель переключается, и на его выходе появляется отрицательное напряжение. В этом случае диод $VD3$ открывается, а диод $VD4$ закрывается. Вследствие закрытия диода $VD4$ снимается положительный потенциал с входов установки нуля микросхем $D1$ и $D2$ и размыкается цепь обратной связи усилителя A . Последнее обеспечивает устойчивое сработавшее состояние усилителя A при токах перегрузки, незначительно превышающих ток срабатывания реле. В связи с открытием диода $VD3$ начинает заряжаться конденсатор $C1$. По мере его заряда возрастает значение отрицательного напряжения на эмиттере транзистора $VT1$. Транзистор $VT1$ откроется, когда напряжение на эмиттере превысит значение отрицательного напряжения базы. Одновременно откроется транзистор $VT2$ и закроется транзистор $VT3$. Через открытые транзисторы $VT1$ и $VT2$ и диод $VD5$ конденсатор разряжается, а вследствие закрытия транзистора $VT3$ на входе

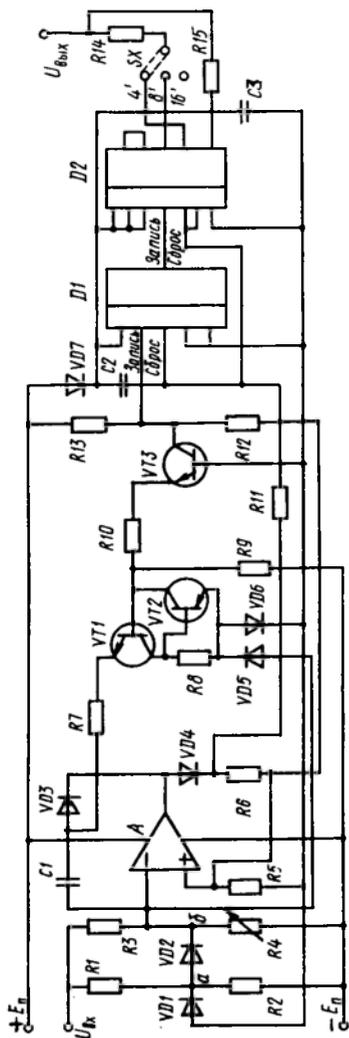


Рис. 3.26. Схема реле тока с зависимой выдержкой времени блока защиты автоматического выключателя ВА-50

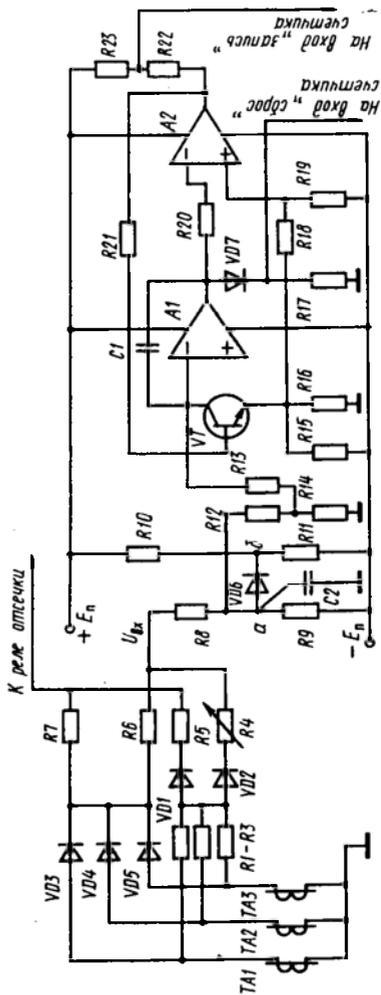


Рис. 3.27. Схема реле тока с зависимой выдержкой времени для блока защиты автоматических выключателей «Электрон» и А3700

«запись» микросхемы $D1$ устанавливается положительное напряжение от источника $+E_n$. Счетчик запускается и начинает подсчет импульсов. Одновременно положительный потенциал через резистор $R12$ подается на неинвертирующий вход усилителя A . Его значение такое, что усилитель переключается и на его выходе появляется напряжение положительной полярности. В таком состоянии усилитель A будет находиться до тех пор, пока конденсатор не разрядится, после чего транзисторы $VT1$ и $VT2$ закрываются, а транзистор $VT3$ открывается и снимает положительный потенциал с входа «запись» счетчика и с неинвертирующего входа усилителя A . Если напряжение $U_{вх}$ остается выше напряжения на инвертирующем входе, то усилитель снова переключается. Отрицательное напряжение на его выходе закрывает диод $VD4$ и открывает диод $VD3$. Конденсатор начинает заряжаться снова, и цикл повторяется.

Для правильного действия счетчика необходимо исключить появление положительного потенциала на его входе «сброс» при кратковременном появлении положительного напряжения на выходе усилителя A , когда транзистор $VT3$ находится в закрытом состоянии. Это обеспечивается фильтрующей RC -цепью, состоящей из резистора $R11$ и конденсатора $C2$. Реле имеет зависимую выдержку времени. При токе, равном $6I_{ном}$, в зависимости от положения переключки SX выдержка времени может быть 4, 8 или 16 с. Зависимая выдержка времени формируется функциональным преобразователем, состоящим из резисторов $R1$, $R2$ и диодов $VD1$, $VD2$.

При небольших кратностях тока напряжение $U_{вх}$ сравнительно невелико и точка a относительно точки b имеет отрицательный потенциал. При этом диод $VD1$ открыт, а диод $VD2$ закрыт и выдержка времени реле уменьшается только из-за увеличения тока через резистор $R3$ с увеличением $U_{вх}$. При значительных $U_{вх}$ потенциал точки a по отношению к точке b становится положительным, диод $VD1$ закрывается, а диод $VD2$ открывается. В этом случае часть тока резистора $R1$ начинает ответвляться на инвертирующий вход усилителя A , вызывая дальнейшее уменьшение выдержки времени.

В настоящее время в системах электроснабжения наряду с автоматическими выключателями серии ВА-50 находят применение выключатели типа «Электрон» и АЗ700. Они снабжены полупроводниковым устройством защиты, предназначенным для действия при перегрузках и междуфазных к.з. и содержащим максимальную токовую защиту с зависимой выдержкой времени и токовую отсечку [21]. Отсутствие в устройстве комплекта от коротких замыканий на землю является его недостатком.

В Ульяновском политехническом институте для уже эксплуатируемых автоматических выключателей «Электрон» и АЗ700 разработана защита на основе

интегральных микросхем, свободная от этого недостатка. Она реагирует на входную воздействующую величину вида [22]

$$|A| = |I_{\phi \max}| + |k3I_0|. \quad (3.5)$$

Для выделения из фазных токов наибольшего тока $I_{\phi \max}$ использован максиселектор. Защита имеет примерно равную чувствительность к междуфазным и однофазным коротким замыканиям при $k = (I_{\kappa(3)}/I_{\kappa(1)}) - 1$. Она содержит две ступени: токовую отсечку и максимальную токовую защиту с зависимой выдержкой времени. На рис. 3.27 показаны преобразующая часть схемы и схема реле с зависимой выдержкой времени. Преобразующая часть состоит из трансформаторов тока $TA1 - TA3$, максиселектора, образованного диодами $VD3 - VD5$, и фильтра тока нулевой последовательности, для выполнения которого использованы резисторы $R1 - R3$. Выходы максиселектора и фильтра тока нулевой последовательности объединены, поэтому напряжение на объединенных выходах пропорционально значению $(|I_{\phi \max}| + |k3I_0|)$. К одному из объединенных выходов подключается реле токовой отсечки, а к другому — реле максимальной токовой защиты. Его основными элементами являются операционные усилители $A1$, $A2$, счетчик импульсов (на рис. 3.27 не показан) и спусковое устройство, использующее транзистор VT . Операционный усилитель $A1$ включен по схеме инвертирующего усилителя. На его инвертирующий вход через резистор $R8$, делитель $R12$, $R14$ и резистор $R13$ подается выпрямленное входное напряжение $U_{вх}$ с одного из объединенных выходов преобразующей части реле. На этот же вход подается отрицательное опорное напряжение от источника $-E_n$ через резистор $R9$.

Операционный усилитель $A2$ включен по схеме компаратора. В исходном состоянии реле абсолютное значение $U_{вх}$ меньше абсолютного значения опорного напряжения, поэтому напряжение на выходе усилителя $A1$ имеет положительную полярность. Положительный потенциал с выхода $A1$ через резистор $R20$ поступает на инвертирующий вход компаратора $A2$. На его выходе появляется напряжение отрицательной полярности. Оно через резистор $R22$ подается на вход «запись» (счетный вход) счетчика и через резистор $R21$ на базу транзистора VT , закрывая его. Одновременно через открытый диод $VD7$ положительный потенциал подан на вход «сброс» счетчика. При этом на выходе счетчика устанавливается логический нуль. При достижении током значения тока срабатывания напряжение $U_{вх}$ возрастет, что приведет к изменению знака напряжения на инвертирующем входе и на выходе операционного усилителя $A1$. При этом начинает заряжаться конденсатор $C1$. Одновременно закрывается диод $VD7$ и снимает положительный потенциал с входа «сброс» счетчика.

По мере заряда конденсатора возрастает значение отрицательного напряжения на инвертирующем входе компаратора $A2$. Когда это напряжение превысит по абсолютному значению напряжение на неинвертирующем входе, компаратор переключится. На его выходе появляется положительный потенциал, который подается на вход «запись» счетчика. Счетчик запускается и начинает подсчет импульсов. Одновременно положительный потенциал подается на базу транзистора VT и открывает его. Через открытый транзистор конденсатор $C1$ разряжается, а на выходе усилителя $A1$ кратковременно устанавливается нулевой потенциал. При этом на выходе компаратора появляется отрицательный потенциал, закрывающий транзистор VT . Конденсатор заряжается снова, и цикл повторяется.

Формирование зависимости выдержки времени реле от тока обеспечивается функциональным преобразователем, состоящим из резисторов $R10$, $R11$ и диода $VD6$. При малых кратностях тока и сравнительно небольших значениях $U_{вх}$ потенциал точки a ниже потенциала точки b и диод $VD6$ закрыт. При этом уменьшение выдержки времени происходит благодаря увеличению тока в резисторе $R8$ с увеличением $U_{вх}$. Когда напряжение $U_{вх}$ достигнет значения, при котором диод откроется, часть тока резистора $R8$ направится через диод $VD6$ и резистор $R11$ к источнику $-E_n$, прекращая дальнейшее уменьшение выдержки вре-

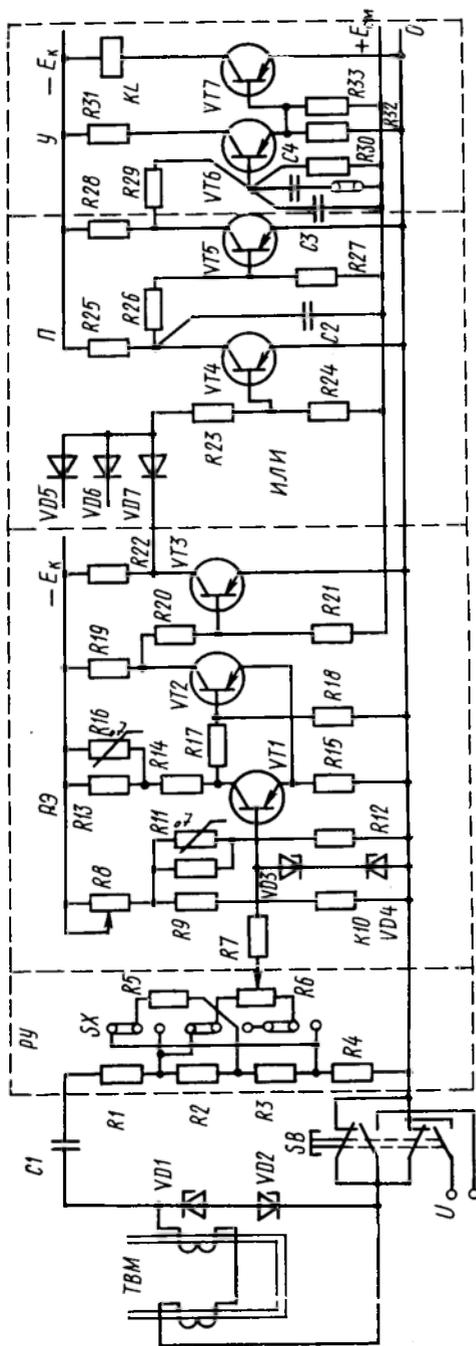


Рис. 3.28. Схема реле тока для защиты МТЗ-М с магнитными трансформаторами тока

мени. Конденсатор $C2$ предотвращает пульсацию входного напряжения на делителе $R12, R14$.

Реле тока для защиты МТЗ-М с магнитными трансформаторами тока (рис. 3.28). Реле состоит из элемента регулировки уставк $ПУ$, релейного элемента $РЭ$, преобразователя $П$ и усилителя $У$. К магнитному трансформатору тока TBM реле подключается через конденсатор $C1$ и стабилитроны $VD1, VD2$, ограничивающие напряжение, подводимое к реле. Емкость конденсатора $C1$ выбирается из условия получения резонанса при частоте 50 Гц. Этим самым понижается чувствительность реле к высшим гармоническим и апериодической составляющей в контролируемом токе. Кнопочный выключатель SB служит для оперативной проверки исправности реле. Подробные сведения о реле даны в [23].

Элемент регулировки уставки $ПУ$ содержит делитель $R1—R4$, резисторы $R5, R6$ и накладку SX , обеспечивающие ступенчатое регулирование уставки. Плавная регулировка производится резистором $R6$.

Релейный элемент $РЭ$ состоит из транзисторов $VT1, VT2$, включенных по схеме симметричного триггера и транзистора $VT3$, используемого в качестве согласующего звена. В исходном состоянии транзисторы

VT1 и *VT3* открыты, а транзистор *VT2* закрыт и сигнал на выходе элемента РЭ отсутствует. Если на вход реле подать сигнал, превышающий уровень срабатывания, то реле сработает. В этом случае транзистор *VT1* будет закрываться, но только в те полупериоды, когда на его базе оказывается положительный потенциал. При этом транзистор *VT2* открывается, а транзистор *VT3* закрывается и на его выходе (выход РЭ) появляются импульсы с частотой входного сигнала. В схеме элемента РЭ стабилитроны *VD3* и *VD4* ограничивают напряжение, подводимое к симметричному триггеру, а терморезисторы *R11* и *R16* обеспечивают термостабилизацию порога срабатывания. С помощью резистора *R8* осуществляется настройка триггера на срабатывание при заданном входном сигнале. Импульсы с выхода элемента РЭ через диод *VD7* элемента ИЛИ подаются на вход преобразователя *П*.

Элемент ИЛИ содержит кроме диода *VD7* диоды *VD5* и *VD6*, используемые для подключения элементов РЭ других фаз к преобразователю *П*.

Преобразователь *П* преобразует импульсы в непрерывный сигнал. Он содержит транзисторы *VT4*, *VT5*, конденсатор *C2* и резисторы *R23—R28*. При отсутствии импульса на входе преобразователя транзистор *VT4* закрыт, а транзистор *VT5* открыт и конденсатор *C2* заряжен. Появление импульса сопровождается открытием транзистора *VT4*, закрытием транзистора *VT5* и быстрым разрядом конденсатора *C2* через открытый транзистор *VT4* и источник смещения. При этом на выходе транзистора *VT5* (выход преобразователя) появляется сигнал. После исчезновения входного импульса транзистор *VT4* закрывается и конденсатор *C2* начинает заряжаться. При этом транзистор *VT5* продолжает оставаться закрытым. Он сможет открыться только после заряда конденсатора *C2* до определенного значения. Однако параметры цепи заряда конденсатора выбраны так, что время заряда конденсатора до необходимого для открытия транзистора *VT5* значения превышает время паузы импульсов. Этим обеспечивается непрерывность сигнала на выходе преобразователя.

Усилитель *У* состоит из транзисторов *VT6* и *VT7*. В исходном состоянии оба транзистора закрыты. Они открываются при появлении сигнала на выходе преобразователя *П*. Этот сигнал преобразуется усилителем до значения, необходимого для срабатывания выходного реле *KL*. Конденсатор *C3* создает необходимое замедление в действии реле и тем самым позволяет отстроиться от случайных кратковременных импульсов, а конденсатор *C4* обеспечивает отстройку реле от импульсов, возникающих при работе разрядников. Реле предназначено для использования в электроустановках напряжением 35—220 кВ и в зависимости от напряжения позволяет устанавливать ток срабатывания в пределах 25—6000 А. На полупроводниковой элементной базе отечественная промышленность выпускает также устройство токовой защиты ТЗК-1

с магнитными трансформаторами тока [23]. Построение полупроводниковых защит с одной электрической величиной подробно рассмотрено в [24].

Реле частоты. В эксплуатации еще имеются индукционные реле частоты, выполненные, как и реле мощности РБМ, на четырехполюсной магнитной системе [21]. Они имеют два существенных

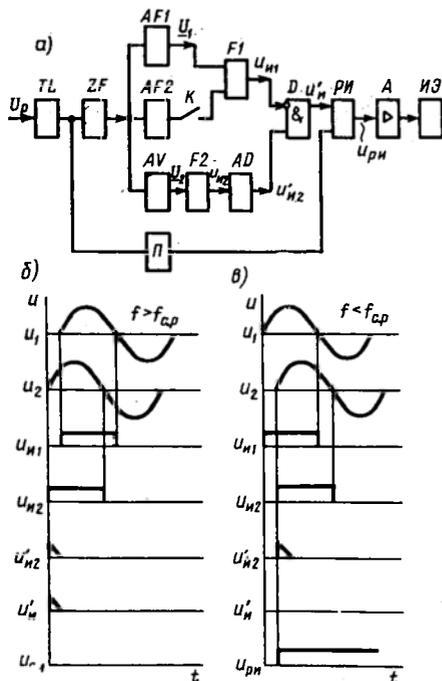


Рис. 3.29. Реле частоты типа РЧ-1 и временные диаграммы, поясняющие его работу

недостатка: чувствительны к изменению напряжения и могут срабатывать при его резких изменениях. Более совершенные реле понижения частоты типа РЧ-1 и реле повышения частоты РЧ-2, выполненные на основе полупроводниковых элементов. Схемы этих реле аналогичны. Реле РЧ-1 содержит частотно-зависимый элемент, рассмотренный выше (см. § 1.6). Изменение частоты напряжения \underline{U}_p на входе схемы сопровождается изменением угла φ между напряжением \underline{U}_1 и \underline{U}_2 на выходе схемы.

Структурная схема реле показана на рис. 3.29, а, временные диаграммы, поясняющие его работу,— на рис. 3.29, б, в. Напряжение \underline{U}_p через разделительный трансформатор TL и частотный фильтр ZF , устраняющий влияние высших гармонических на работу реле, подается на фазоповоротную схему, состоящую из делителя напряжения AV и двух частотно-зависимых элементов $AF1$ и $AF2$. Первый из них слу-

жит для изменения частоты срабатывания, а второй — для изменения частоты возврата реле. В случае необходимости элемент $AF2$ можно подключить к схеме через внешний контакт K .

Напряжения \underline{U}_1 и \underline{U}_2 подаются на входы идентичных формирователей импульсов, соответственно $F1$ и $F2$, которые преобразуют синусоидальные напряжения u_1 и u_2 в импульсы $u_{н1}$ и $u_{н2}$ прямоугольной формы длительностью до половины периода каждый. Дифференцирующий элемент AD формирует из переднего фронта импульса $u_{н2}$ короткий импульс $u'_{н2}$, который вместе с прямоугольным импульсом $u_{н1}$ подается на логический элемент D , выполняющий логическую операцию ЗАПРЕТ. Логический элемент D про-

пускает импульс $u'_{и2} = u'_и$ только в случае отсутствия на входе импульса $u_{и1}$. Это наблюдается при $f > f_{с.р}$, когда \underline{U}_1 отстает по фазе от напряжения \underline{U}_2 (рис. 3.29, б). Расширитель импульсов *РИ* увеличивает длительность импульса и выполнен так, что при подаче на его вход импульса $u'_и$ сигнал на его выходе отсутствует.

При $f < f_{с.р}$ импульс $u'_и$ на выходе логического элемента *D*, т. е. на входе *РИ*, отсутствует, так как импульс $u'_{и2}$ поступает на вход элемента *D* позже импульса $u_{и1}$ (рис. 3.29, в). При этом на выходе *РИ* возникает выходной потенциальный сигнал $U_{рн}$, который усиливается усилителем *A* и подается к исполнительному элементу *ИЭ*; реле срабатывает. Таким образом, рассмотренное устройство действует как реле понижения частоты.

Для исключения ложного срабатывания реле при исчезновении напряжения \underline{U}_p в схему включен пусковой элемент *П*, который разрешает действовать расширителю импульсов *РИ* только при наличии напряжения на входе реле. Реле РЧ-1 имеет диапазон уставок частоты срабатывания $f_{с.р} = 50 \dots 45$ Гц и частоты возврата $f_{в.р} = 46 \dots 51$ Гц. Реле имеет три уставки времени срабатывания: $t_{с.р} = 0,15; 0,3; 0,45$ с.

§ 3.5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ С ДВУМЯ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВЕЛИЧИНАМИ

К ним относят реле направления мощности *KW*, реле сопротивления *KZ* и дифференциальные реле с торможением *KAS*. Для их выполнения используют рассмотренные выше схемы сравнения двух электрических величин. Элементной базой таких реле наряду с полупроводниковыми диодами и триодами являются интегральные микросхемы.

Реле направления мощности. Для выполнения реле направления мощности можно использовать рассмотренные выше схемы сравнения двух электрических величин по их абсолютному значению (см. § 3.3, рис. 3.18).

На рис. 3.30 дана векторная диаграмма, характеризующая работу реле, сравнивающего абсолютное значение величины $A = U_p e^{j\alpha} + k I_p$ с абсолютным значением величины $B = U_p e^{j\alpha} - k I_p$ в схеме с циркуляцией токов. Здесь коэффициенты $k_1 = k_3 = e^{j\alpha}$, а $k_2 = k_4 = k$. Реле срабатывает, если $|A| \geq |B|$. При построении за исходный принят вектор напряжения $U_p e^{j\alpha}$, повернутый относительно вектора \underline{U}_p на угол α . При этом вектор тока \underline{I}_p отстает от вектора напряжения $U_p e^{j\alpha}$ на некоторый угол, равный $(\varphi_p + \alpha)$. При изменении угла φ_p концы векторов \underline{A} и \underline{B}

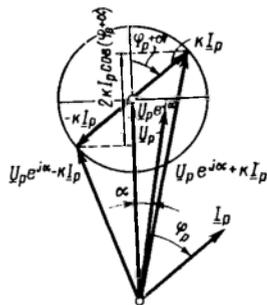


Рис. 3.30. Векторная диаграмма реле направления мощности, сравнивающего две электрические величины по их абсолютному значению

перемещаются по окружности радиусом kI_p с центром в конце вектора $U_p e^{i\alpha}$, а их модули изменяются так, что $|A|$ оказывается равным меньшим или большим $|B|$. Таким образом, рассматриваемая схема сравнения представляет собой орган направления мощности, так как действует в пределах углов $-(\pi/2 + \alpha) \leq \varphi_p \leq (\pi/2 - \alpha)$.

Отечественной промышленностью выпускается несколько типов реле, выполненных на принципе сравнения двух электрических величин по фазе. Для этой цели, в частности, используют схему кольцевого фазочувствительного выпрямителя (см. § 3.3, рис. 3.22). Однако более совершенно реле РМ-11 [25]. В нем отдельно сравнивается время совпадения мгновенных значений электрических величин в положительном полупериоде с временем несовпадения и время совпадения этих величин с временем их несовпадения в отрицательном полупериоде. Этим достигается отстройка реле от аperiodических составляющих во входных сравниваемых величинах. Функциональная схема реле дана на рис. 3.31, а. Она содержит фазоповоротные устройства 1 и 2, с помощью которых обеспечивается заданное значение угла максимальной чувствительности. С выхода фазоповоротных устройств синусоидальные сигналы положительной полярности поступают на схему совпадения 3, а сигналы отрицательной полярности — на схему совпадения 4. Здесь они преобразуются в положительные прямоугольные импульсы. Далее эти импульсы интегрируются соответствующими интеграторами 5 и 6. Ограниченные элементом 7, они суммируются сумматором 8 и поступают на вход порогового элемента 9, который управляет органом 10. Функциональная схема реализована с использованием микроэлектронной элементной базы. Принципиальная схема реле показана на рис. 3.31, б, а ее работа поясняется на рис. 3.31, в. Схемы совпадения (3, 4) выполнены на диодах $VD1—VD6$, транзисторах $VT1$ и $VT2$ и резисторах $R1—R6$. Если на входе схем величины A_i и B_i отсутствуют, то диоды $VD1—VD4$ открыты и на базы транзисторов $VT1$, $VT2$ подаются положительные потенциалы. Транзисторы оказываются открытыми. При наличии несовпадающих по фазе A_i и B_i транзисторы будут оставаться открытыми, так как в течение времени несовпадения открытым будет один из каждой пары диодов $VD1$, $VD3$ и $VD2$, $VD4$. Только при совпадении по фазе A_i и B_i оба диода каждой пары закрываются. В этом случае потенциал базы соответствующего транзистора становится отрицательным и транзистор закрывается на время совпадения входных величин A_i и B_i . Таким образом, транзисторы играют роль ключей, размыкающихся на интервалах совпадения знаков величин A_i и B_i . При этом непрерывные сигналы на входе схем совпадения преобразуются в дискретные сигналы a и b на выходе (рис. 3.31, в). Эти сигналы подаются на интеграторы (5, 6), состоящие из конденсаторов $C1$, $C2$, зарядных резисторов $R7$, $R8$, разрядных резисторов $R9$, $R10$ и диодов $VD7$, $VD8$. При на-

личии сигнала соответствующий конденсатор заряжается, а при отсутствии сигнала разряжается. Таким образом, прямоугольные сигналы на входе интеграторов преобразуются в напряжения U_1 , U_2 , изменяющиеся пилообразно на выходе. Эти напряжения огра-

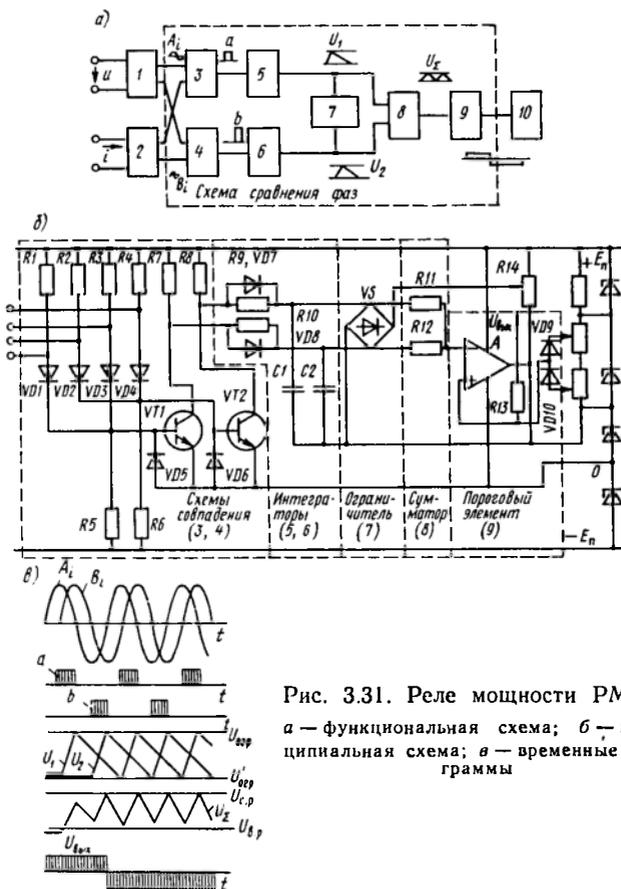


Рис. 3.31. Реле мощности РМ-11:

а — функциональная схема; б — принципиальная схема; в — временные диаграммы

ничиваются ограничителем 7, состоящим из выпрямителя VS . Пределы ограничения $U_{огр}$ и $U'_{огр}$ устанавливаются резистором $R14$. Выходные напряжения интеграторов U_1 и U_2 суммируются сумматором 8, состоящим из резисторов $R11$, $R12$ равного сопротивления. Поэтому напряжение на выходе сумматора $U_x = 0,5(U_1 + U_2)$. В качестве порогового элемента 9 использован операционный усилитель A , включенный по схеме триггера Шмитта. На его инвертирующий вход подается положительное напряжение U_x . При достижении этим напряжением значения напряжения срабатывания триггер Шмитта переключается и на его выходе появляется на-

пряжение отрицательной полярности. Реле срабатывает. Если время совпадения, а следовательно, и продолжительность импульсов меньше допустимых, то конденсаторы $C1$ и $C2$ не успеют зарядиться до требуемых напряжений, а напряжение U_x не достигает значения напряжения срабатывания $U_{с.р.}$. В этом случае реле сработать не сможет. Параметры реле: минимальное напряжение срабатывания не превышает значения $0,25$ В, потребляемая мощность

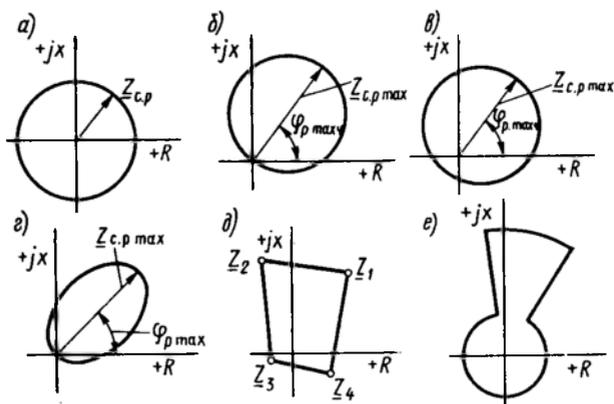


Рис. 3.32. Характеристики реле сопротивления

во входных цепях тока при $I_{ном}$ не более $0,5$ В·А, во входных цепях напряжения при $U_{ном}$ — не более 3 В·А; угол максимальной чувствительности (-30 ± 5) ; (-45 ± 5) °.

Реле сопротивления КЗ. Реле применяется в качестве измерительного органа в дистанционных зашитах. К измерительному реле сопротивления, как и к реле направления мощности, подводятся напряжение \underline{U}_p и ток \underline{I}_p . Отношение $\underline{U}_p/\underline{I}_p$, определяющее некоторое фиктивное комплексное сопротивление \underline{Z}_p , называется *характеристической величиной*. Обычно применяют минимальное реле сопротивления, срабатывающее при снижении значения \underline{Z}_p до заданного сопротивления срабатывания $\underline{Z}_{с.р.}$. Характеристика срабатывания реле в комплексной плоскости RX представляет собой геометрическое место точек, удовлетворяющих условию $\underline{Z}_p = \underline{Z}_{с.р.}$. В зависимости от вида характеристики различают *реле полного сопротивления* (рис. 3.32, а), *направленное реле сопротивления* (рис. 3.32, б), *реле сопротивления со смещенной* (рис. 3.32, в) и *с эллиптической* (рис. 3.32, г) характеристиками. На основе интегральных микросхем отечественная промышленность выпускает реле сопротивления с более сложными характеристиками, например имеющими четырехугольную форму (рис. 3.32, д). Для защиты контактной сети переменного тока электрифицированного транспорта используется реле с характеристикой, показанной на рис.

3.32, *e* [26]. Из характеристик следует, что $\underline{Z}_{с.р}$ постоянно только у реле полного сопротивления. У остальных реле оно зависит от угла φ_p . Некоторому углу $\varphi_{p \max}$ соответствует наибольшее сопротивление срабатывания, т. е. наибольшая чувствительность. Для получения характеристики срабатывания в виде окружности (рис. 3.32, *a*, *б*, *в*) в общем случае необходимо сравнить по абсолютному значению или по фазе две величины вида

$$\underline{A} = \underline{k}_1 \underline{U}_p + \underline{k}_2 \underline{I}_p; \quad \underline{B} = \underline{k}_3 \underline{U}_p + \underline{k}_4 \underline{I}_p \quad (3.6)$$

Формирование величин можно осуществить с помощью схем, рассмотренных выше (см. § 1.6). Вид характеристики определяется коэффициентами $\underline{k}_1 - \underline{k}_4$. Выбор коэффициентов для получения заданной характеристики дан в [15]. Так, например, при $\underline{k}_1 = \underline{k}_3 = \underline{k}_U$ и $\underline{k}_2 = -\underline{k}_4 = \underline{k}_I$ получается реле полного сопротивления (рис. 3.32, *a*). Для выполнения реле с более сложной характеристикой, например в виде четырехугольника, необходимо одновременно сравнивать четыре величины вида (3.6), при этом более удобным представляется сравнение по фазе.

Реле сопротивления, сравнивающие электрические величины по их абсолютному значению. На рис. 3.33 показана упрощенная схема реле со смещенной характеристикой (см. рис. 3.32, *в*). Для реализации такой характеристики в сравниваемых величинах \underline{A} и \underline{B} (см. выражение (3.6)) коэффициенты \underline{k}_1 и \underline{k}_3 необходимо принять вещественными, $\underline{k}_4 = 0$, а \underline{k}_2 должен быть комплексным. Соответственно величина \underline{B} подводится к схеме сравнения непосредственно через трансформатор напряжения TLV , а величина \underline{A} получается путем суммирования слагаемого $\underline{k}_1 \underline{U}_p$ с двумя составляющими: вещественной частью слагаемого $\underline{k}_2 \underline{I}_p$, получаемой от трансформатора тока TLA , нагруженного резистором, и мнимой частью, получаемой от трансреактора TAV . Схема сравнения содержит два двухполупериодных выпрямителя $VS1$ и $VS2$ и реагирующий элемент EA . Для сглаживания пульсации выпрямленных токов предусмотрен конденсатор C . Время действия такого реле сопротивления составляет $t_{с.р} = 0,04 \dots 0,06$ с и не зависит от \underline{Z}_p .

В сельских сетях напряжением 6—20 кВ для защиты секцио-

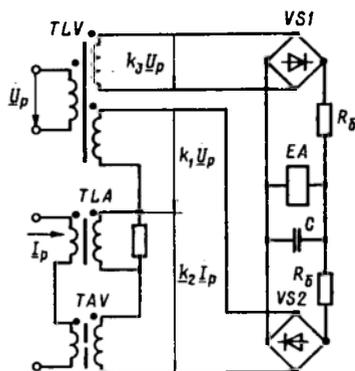


Рис. 3.33. Реле сопротивления на основе сравнения абсолютных значений электрических величин

нированных линий с двусторонним питанием и многократно секционированных радиальных линий с односторонним питанием применяется дистанционная защита типа ДЗ-10. Защита содержит пусковой орган — трехфазное реле полного сопротивления (или реле тока) мгновенного срабатывания — и измерительный орган — трехфазное реле полного сопротивления, имеющее непрерывно зависящую от удаленности места повреждения (от \underline{Z}_p) выдержку времени. Реле выполнено на основе схемы сравнения величин \underline{A} и \underline{B} по их абсолютному значению, причем сравнивается минимальное значение одной величины с максимальным значением другой. Этим достигается независимость \underline{Z}_p от вида многофазного короткого замыкания. Выделение минимального и максимального значений сравниваемых величин производят с помощью миниселектора и максиселектора.

У измерительного органа защиты ДЗ-10 (рис. 3.34, а) миниселектор состоит из диодов $VD1 - VD3$ и представляет собой устройство, на вход которого подаются выпрямленные напряжения U_{01}, U_{02}, U_{03} , пропорциональные линейным напряжениям U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} , а на выходе всегда выделяется наименьшее из напряжений $U_{01} - U_{03}$. Таким образом, выходное напряжение миниселектора всегда пропорционально напряжению поврежденных фаз $k_U U_K$.

Максиселектор состоит из диодов $VD10 - VD15$ и представляет собой устройство, на вход которого подаются с трансреакторов $TAV1 - TAV3$ напряжения, пропорциональные разности фазных токов ($\underline{I_a - I_b}$), ($\underline{I_b - I_c}$) и ($\underline{I_c - I_a}$), а на выходе выделяется наибольшее из указанных напряжений. Оно пропорционально токам поврежденных фаз $k_I I_K$. Выходы селекторов соединены с рассмотренной выше схемой сравнения. Реагирующим элементом схемы является магнитоэлектрическое реле K . Напряжение на его обмотке ограничивает диод $VD7$, конденсатор $C4$ сглаживает пульсации сравниваемых величин, а резистор $R7$ создает режим критического ускокоения рамки реле.

Для получения зависимой от \underline{Z}_p выдержки времени срабатывания реле сравниваемая величина $k_I I_p$ подводится к реагирующему элементу через цепь $R8 - C5$. При этом напряжение на конденсаторе $C5$ возрастает по закону $u_c = k_I I_K (1 - e^{-t/(RC)})$ (при разомкнутом контакте $KA.1$). Сравнивается между собой u_c и $k_U U_K$. Граничным условием срабатывания реле сопротивления является равенство

$$k_U U_K = k_I I_K (1 - e^{-t_{c.p}/(RC)}) \quad \text{или} \quad \underline{Z}_{c.p} = \underline{Z}_Y (1 - e^{-t_{c.p}/(RC)}).$$

Отсюда

$$t_{c.p} = RC \ln [\underline{Z}_Y / (\underline{Z}_Y - \underline{Z}_{c.p})], \quad (3.7)$$

где $\underline{Z}_Y = k_I / k_U$ — сопротивление уставки реле.

Характеристика $t_{c.p} = f(\underline{Z}_p)$ показана на рис. 3.34, в. Выражение (3.7) для $t_{c.p}$ справедливо, если перед зарядом конденсатора $C5$ напряжение $u_c = 0$. Это условие обеспечивается тем, что конденсатор $C5$ замкнут разомкнутым контактом $KA.1$ пускового органа защиты, содержащего реле тока. Работу миниселектора поясняет эквивалентная схема цепи сравнения (рис. 3.34, б), на которой R — сопротивление реагирующего элемента, u_c — напряжение, подаваемое к цепи сравнения от конденсатора $C5$.

Пусть выполняется условие $U_{01} < U_{02} < U_{03}$. Если при этом $u_c < U_{01}$, то все диоды $VD1 - VD3$ оказываются закрытыми (такое состояние схема имеет до срабатывания пускового органа). После срабатывания пускового органа ($KA.1$

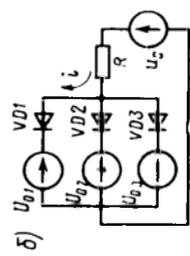
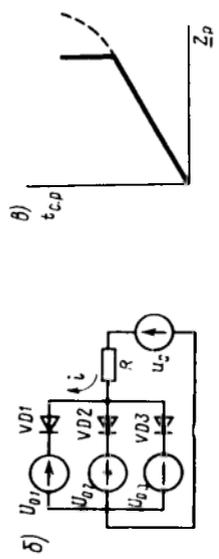
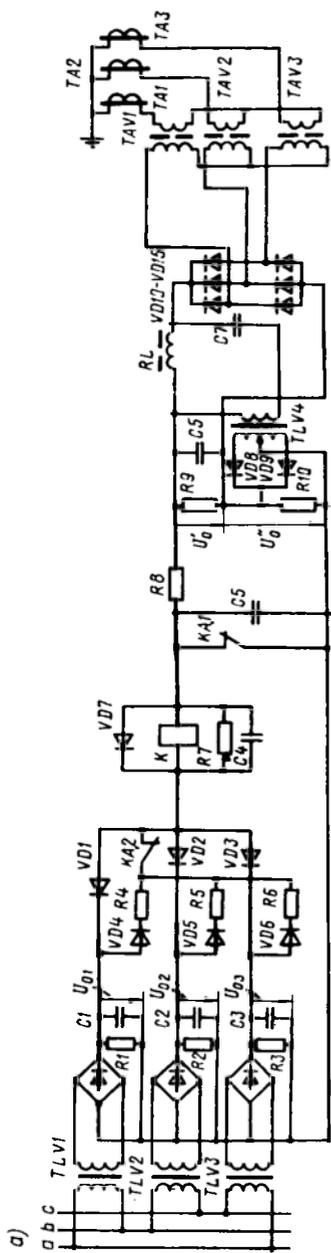


Рис. 3.34. Дистанционный орган защиты ДЗ-10 и характеристика выдержки времени

размыкается) напряжение u_c начинает нарастать. С момента времени, когда оно достигает значения $u_c > U_{01}$, диод $VD1$ открывается и под действием напряжения $u_c - U_{01}$ начинает проходить ток i в направлении, показанном на рис. 3.34, б стрелкой. Диоды $VD2$ и $VD3$ продолжают оставаться закрытыми, так как к первому из них прикладывается запирающее напряжение $U_{02} - u_c$, а ко второму — напряжение $U_{03} - u_c$. Таким образом, ток в реагирующем элементе определяется разностью напряжения u_c и наименьшего из напряжений $U_{01} - U_{03}$.

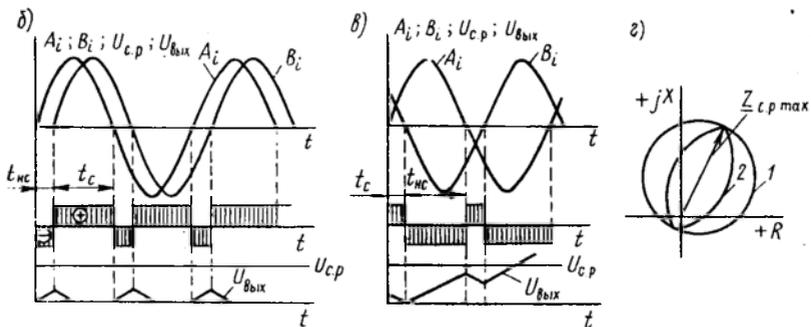
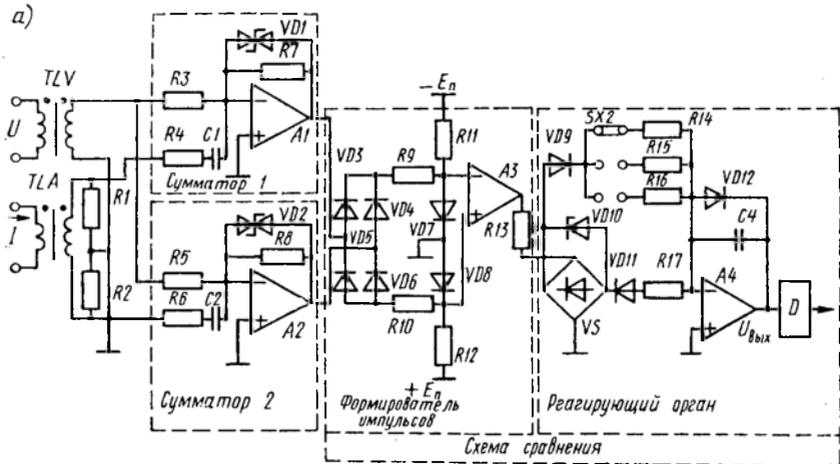


Рис. 3.35. Реле сопротивления, сравнивающее электрические величины по фазе комплектного устройства БРЭ-2701:

а — принципиальная схема; б, в — временные диаграммы; г — характеристика

Так как до срабатывания пускового органа защиты диоды минселектора $VD1 - VD3$ закрыты, то контактом $KA.2$ пускового органа к схеме сравнения подключаются цепи $VD4 - R4$, $VD5 - R5$, $VD6 - R6$, создающие тормозной ток. Этот ток необходим для надежного возврата реле К.

Диоды $VD10 - VD15$ в режиме максиселектора работают по обычной схеме выпрямления. Выходное напряжение U'_o этой схемы при двухфазных замыканиях оказывается меньшим, чем при трехфазных. Чтобы сравниваемая величина не зависела от вида повреждения, при двухфазных замыканиях к напря-

жению U'_0 прибавляется выпрямленное напряжение U''_0 второй гармонической, выпрямитель которой собран на диодах $VD8$ и $VD9$.

Реле сопротивления, сравнивающее электрические величины по фазе. Упрощенная схема реле сопротивления, сравнивающего время совпадения t_c с временем несовпадения t_{nc} мгновенных значений двух синусоидальных величин \underline{A}_i и \underline{B}_i , показана на рис. 3.35, а. Алгоритм сравнения имеет вид

$$-\pi/2 \leq \arg \underline{A}/\underline{B} \leq \pi/2. \quad (3.8)$$

Реле выполнено на современной микроэлектронной базе и предназначено для комплектного устройства БРЭ-2701 дистанционной защиты линий 35 кВ сельскохозяйственного назначения с односторонним и двусторонним питанием [27, 28]. Схема формирования сравниваемых величин \underline{A} и \underline{B} состоит из трансформатора напряжения TLV , трансформатора тока TLA и двух сумматоров, выполненных на основе инвертирующих операционных усилителей $A1$ и $A2$. Коэффициенты k_1 и k_3 в выражении (3.6) являются вещественными и реализуются резисторами $R3$ и $R5$. Вторые члены величин \underline{A} и \underline{B} с комплексными коэффициентами \underline{k}_2 и \underline{k}_4 формируются резисторами $R1$, $R4$ и $R2$, $R6$ и конденсаторами $C1$ и $C2$.

Стабилитроны $VD1$ и $VD2$ в цепи обратной связи обеспечивают линейный режим работы операционных усилителей $A1$ и $A2$ при больших значениях входных сигналов, что необходимо для правильного функционирования сумматоров. Сформированные величины \underline{A} и \underline{B} с выходов сумматоров подаются к формирователю импульсов. Его схема содержит максиселектор положительных сигналов на основе диодов $VD3$, $VD4$, выделяющий наибольший из положительных сигналов, и максиселектор, состоящий из диодов $VD5$, $VD6$, обеспечивающий выделение наибольшего из отрицательных сигналов. Схема содержит также делитель напряжения из резисторов $R9$, $R11$, делитель напряжения из резисторов $R10$, $R12$, операционный усилитель $A3$, включенный дифференциально по отношению к средним точкам делителей. Правильное функционирование схемы обеспечивается тем, что при совпадении знаков мгновенных значений сравниваемых величин на выходе усилителя $A3$ появляется положительный потенциал, а при несовпадении — отрицательный. В самом деле, при несовпадении знаков сравниваемых величин обязательно открыто хотя бы по одному из диодов максиселекторов положительных и отрицательных сигналов. При этом положительное напряжение открывает диод $VD7$, а отрицательное напряжение с максиселектора отрицательных сигналов открывает диод $VD8$. В результате прохождения тока через резистор $R9$ потенциал инвертирующего входа усилителя $A3$ увеличивается и становится положительным, а ток, проходящий через резистор $R10$, снижает потенциал неинвертирующего входа и он становится отрицательным. В связи с этим на выходе усилите-

ля $A3$ появляется отрицательный импульс, длительность которого пропорциональна времени $t_{нс}$ (рис. 3.35, б).

При совпадении, например, положительных значений сравниваемых величин максиселектор положительных сигналов выделяет максимальный положительный сигнал, а максиселектор отрицательных сигналов выделяет минимальный положительный сигнал. В этом случае потенциал инвертирующего входа усилителя $A3$ остается положительным, а потенциал неинвертирующего входа изменяет полярность. Он становится тоже положительным, и его значение определяется соотношением сопротивлений резисторов $R10, R12$ с учетом падения напряжения на открытом диоде максиселектора отрицательных сигналов. В этом случае на выходе усилителя $A3$ появляется положительный импульс, длительность которого пропорциональна времени t_c . Аналогичный результат получается при совпадении отрицательных значений сравниваемых величин. Положительные и отрицательные выходные сигналы формирователя импульсов подаются на вход реагирующего органа, состоящего из выпрямителя VS , операционного усилителя $A4$, включенного по схеме инвертирующего усилителя, и порогового элемента D . Диод $VD12$ ограничивает отрицательные сигналы на выходе усилителя $A4$ и тем самым защищает вход порогового элемента D . Положительные и отрицательные сигналы стабилизируются по амплитуде выпрямителем VS и стабилитроном $VD10$.

Схема работает следующим образом. При подаче на вход выпрямителя VS отрицательных сигналов открывается диод $VD11$ и отрицательный сигнал подается на инвертирующий вход усилителя $A4$. В этом случае диод $VD12$ закрыт, а конденсатор $C4$ заряжается в течение времени $t_{нс}$, напряжение $U_{вых}$ на выходе усилителя $A4$ повышается (рис. 3.35, а, б). При совпадении знаков сравниваемых величин на вход выпрямителя VS подается положительный сигнал, открываются диоды $VD9$ и $VD12$, конденсатор $C4$ разряжается в течение времени t_c . Напряжение $U_{вых}$ снижается. Если $t_{нс} > t_c$, то через некоторое время напряжение $U_{вых}$ достигает значения напряжения срабатывания $U_{с.р}$ порогового элемента D и реле срабатывает (рис. 3.35, в).

С помощью разрядных резисторов $R14—R16$ изменяют характеристику реле. При равных резисторах в цепях заряда $R17$ и разряда $R14—R16$ реле имеет характеристику в виде окружности (рис. 3.35, з, характеристика 1). Уменьшение разрядного сопротивления приводит к сужению характеристики (рис. 3.35, з, характеристика 2). Имеются и другие реле сопротивления, сравнивающие электрические величины по фазе. Например, реле с прямоугольной характеристикой в комплектном устройстве ЯРЭ-2201 для защиты линий 6—10 кВ [29].

Дифференциальные реле тока с торможением. У дифференциальных реле тока с торможением ток срабатывания $I_{с.р}$ автоматически изменяется с изменением тока управления, называемого тор-

мозным током $I_{\text{трм}}$. Зависимость эта, как уже отмечалось, называется *тормозной характеристикой* (рис. 3.36). Степень торможения определяется наклоном характеристики, т. е. отношением $I_{\text{с.р}}/I_{\text{трм}}$, которое называется *коэффициентом торможения*. На рис. 3.36 ток срабатывания

$$I_{\text{с.р}} = I'_{\text{с.р}} + I_{\text{с.р min}} = k_{\text{трм}} I_{\text{трм}} + I_{\text{с.р min}}$$

Таким образом, реле с торможением срабатывает при условии

$$I_{\text{с.р}} - k_{\text{трм}} I_{\text{трм}} - I_{\text{с.р min}} = 0, \quad (3.9)$$

где $I_{\text{с.р min}}$ — минимальный ток срабатывания реле при отсутствии торможения. Из (3.9) следует, что реле с торможением сравнивает две электрические величины. Поэтому для его выполнения можно использовать все рассмотренные выше способы и схемы сравнения (см. § 3.3).

Например, схему сравнения абсолютных значений электрических величин (рис. 3.18, б). Если принять $A = k_p I_{\text{раб}}$, а $B = k_T I_{\text{трм}}$, то при $I_{\text{с.р min}} = 0$ реле срабатывает при $|A| - |B| = 0$, т. е. при условии $k_p I_{\text{раб}} - k_T I_{\text{трм}} = 0$. Реагирующий орган реле с торможением выполняется с конечной чувствительностью — некоторым напряжением действия, для преодоления которого при $I_{\text{трм}} = 0$ необходимо, чтобы было $A = k_p I_{\text{с.р min}}$. С учетом этого условие срабатывания примет вид $k_p I_{\text{с.р min}} - k_T I_{\text{трм}} - k_p I_{\text{с.р min}} = 0$, откуда

$$I_{\text{с.р}} - k_{\text{трм}} I_{\text{трм}} - I_{\text{с.р min}} = 0.$$

При выполнении дифференциальной защиты трансформаторов приходится считаться с бросками тока намагничивания, которые возникают при включении ненагруженного трансформатора и могут многократно превышать его номинальный ток. Для исключения ложных срабатываний защиты ее ток срабатывания приходится завышать. При этом чувствительность защиты может оказаться недостаточной даже при использовании рассмотренных выше реле РНТ и ДЗТ (см. § 2.3). В связи с этим выпускаются дифференциальные реле, у которых отстройка от бросков тока намагничивания осуществляется путем выявления различий между формой кривой тока к.з. и формой кривой тока намагничивания [30, 31].

Полупроводниковая микроэлектронная элементная база позволяет сравнительно просто выполнять такие реле. Броски тока намагничивания могут быть как однополярные, так и разнополярные. В том и в другом случае имеются бестоковые паузы, а период выпрямленного тока намагничивания равен периоду T промышленной частоты (рис. 3.37, а). В связи с этим в выпрямленном токе наряду с постоянной составляющей содержится значительная переменная составляющая промышленной частоты. Установившийся ток к.з. является синусоидальным. При его выпрямлении период тока уменьшается в два раза (рис. 3.37, б), а это значит, что в выпрямленном синусоидальном токе основной является составляющая двойной частоты, а составляющая промышленной частоты отсутствует. При переходных процессах в общем случае в токе к.з. содержится

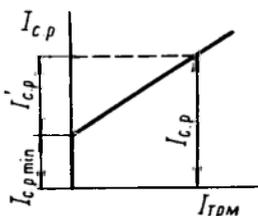


Рис. 3.36. Характеристика реле с торможением

аперриодическая составляющая, поэтому в выпрямленном токе к.з. тоже содержится составляющая промышленной частоты. Она появляется также в результате погрешностей трансформаторов тока, используемых в дифференциальной защите. Но эта составляющая значительно меньше, чем при бросках тока намагничивания. Это различие между выпрямленным током к.з. и выпрямленным током намагничивания положено в основу дифференциального реле.

Реле действует в зависимости от уровня тока промышленной частоты, содержащегося в выпрямленном токе. Для этого в схему реле включают фильтр

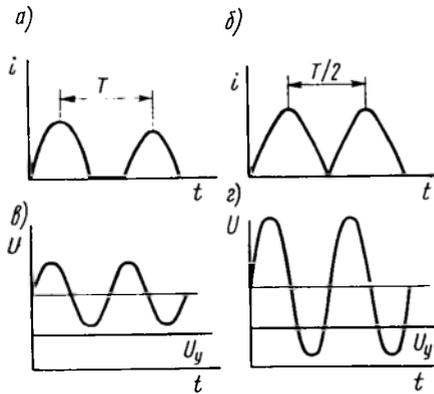


Рис. 3.37. Использование различия между формой кривой тока к.з. и формой кривой бросков тока намагничивания для выполнения дифференциальных реле

нижних частот, пропускающий постоянную составляющую и составляющую промышленной частоты. Но предварительно, как у любого полупроводникового реле тока, ток преобразуется в напряжение. В зависимости от соотношения между постоянной и переменной составляющими кривая результирующего напряжения смещается относительно оси времени (рис. 3.37, в, г). Реле срабатывает, если это смещение превысит некоторое постоянное значение и кривая результирующего напряжения расположится выше прямой, соответствующей напряжению уставки U_y реле (рис. 3.37, в). Это имеет место при к.з., когда составляющая промышленной частоты незначительна. При бросках тока намагничивания переменная составляющая значительно возрастает и кривая результирующего напряжения опускается ниже прямой U_y . В этом случае реле не должно действовать.

Указанный принцип реализован в дифференциальном реле, используемом в комплектном устройстве ЯРЭ-2201 [32], предназначенном для защиты понижающих трансформаторов. При этом ток срабатывания можно снизить до $0,5I_{т.ном}$. Реле используют также в дифференциальной защите высоковольтных электродвигателей. Имеются две модификации реле: реле без торможения и реле с торможением. Упрощенная схема реле с торможением показана на рис. 3.38, а. Напряжение, пропорциональное рабочему току $I_{раб}$, с выхода выпрямителя $VS1$ подается на инвертирующий вход операционного усилителя $A1$, образующего с резисторами $R6$, $R7$ и конденсаторами $C2$, $C3$ активный фильтр нижних частот. Конденсатор $C1$ на входе выпрямителя $VS1$ исключает влияние гармонических частотой более 0,5 кГц. Нагрузкой выпрямителя служит делитель напряжения на резисторах $R3$, $R4$. Стабилитрон $VD3$ ограничивает выпрямленное напряжение и тем самым обеспечивает работу операционного усилителя $A1$ в линейном режиме. Фильтр пропускает без изменения постоянную составляющую, усиливает в 2,2—2,5 раза переменную составляющую промышленной частоты и ослабляет в 3 раза вторую и высшие гармонические выпрямленного напряжения. При этом на выходе операционного усилите-

жению U'_0 прибавляется выпрямленное напряжение U''_0 второй гармонической, выпрямитель которой собран на диодах $VD8$ и $VD9$.

Реле сопротивления, сравнивающее электрические величины по фазе. Упрощенная схема реле сопротивления, сравнивающего время совпадения t_c с временем несовпадения t_{nc} мгновенных значений двух синусоидальных величин \underline{A}_i и \underline{B}_i , показана на рис. 3.35, а. Алгоритм сравнения имеет вид

$$-\pi/2 \leq \arg \underline{A}/\underline{B} \leq \pi/2. \quad (3.8)$$

Реле выполнено на современной микроэлектронной базе и предназначено для комплектного устройства БРЭ-2701 дистанционной защиты линий 35 кВ сельскохозяйственного назначения с односторонним и двусторонним питанием [27, 28]. Схема формирования сравниваемых величин \underline{A} и \underline{B} состоит из трансформатора напряжения TLV , трансформатора тока TLA и двух сумматоров, выполненных на основе инвертирующих операционных усилителей $A1$ и $A2$. Коэффициенты k_1 и k_3 в выражении (3.6) являются вещественными и реализуются резисторами $R3$ и $R5$. Вторые члены величин \underline{A} и \underline{B} с комплексными коэффициентами \underline{k}_2 и \underline{k}_4 формируются резисторами $R1$, $R4$ и $R2$, $R6$ и конденсаторами $C1$ и $C2$.

Стабилитроны $VD1$ и $VD2$ в цепи обратной связи обеспечивают линейный режим работы операционных усилителей $A1$ и $A2$ при больших значениях входных сигналов, что необходимо для правильного функционирования сумматоров. Сформированные величины \underline{A} и \underline{B} с выходов сумматоров подаются к формирователю импульсов. Его схема содержит максиселектор положительных сигналов на основе диодов $VD3$, $VD4$, выделяющий наибольший из положительных сигналов, и максиселектор, состоящий из диодов $VD5$, $VD6$, обеспечивающий выделение наибольшего из отрицательных сигналов. Схема содержит также делитель напряжения из резисторов $R9$, $R11$, делитель напряжения из резисторов $R10$, $R12$, операционный усилитель $A3$, включенный дифференциально по отношению к средним точкам делителей. Правильное функционирование схемы обеспечивается тем, что при совпадении знаков мгновенных значений сравниваемых величин на выходе усилителя $A3$ появляется положительный потенциал, а при несовпадении — отрицательный. В самом деле, при несовпадении знаков сравниваемых величин обязательно открыто хотя бы по одному из диодов максиселекторов положительных и отрицательных сигналов. При этом положительное напряжение открывает диод $VD7$, а отрицательное напряжение с максиселектора отрицательных сигналов открывает диод $VD8$. В результате прохождения тока через резистор $R9$ потенциал инвертирующего входа усилителя $A3$ увеличивается и становится положительным, а ток, проходящий через резистор $R10$, снижает потенциал неинвертирующего входа и он становится отрицательным. В связи с этим на выходе усилите-

ля $A1$ отрицательное напряжение, изменяющееся из-за переменной составляющей промышленной частоты.

В исходном состоянии реле (рис. 3.38, б) рабочий ток $I_{раб}$ и напряжение на выходе выпрямителя отсутствуют, а поэтому отсутствует также напряжение U_1 на выходе фильтра (выход $A1$), который связан с инвертирующим входом компаратора $A2$. При отсутствии сигнала от фильтра положительный потенциал инвертирующего входа компаратора $A2$ оказывается больше потенциала неинвертирующего входа и на выходе компаратора имеется отрицательное напряжение U_2 . В этом случае диод $VD6$ открыт, конденсатор $C4$ разряжен, на базе транзистора VT имеется небольшой положительный потенциал. Резисторы $R17$ и $R18$ имеют равные сопротивления, поэтому потенциал эмиттера транзистора VT близок к нулю. В этом случае транзистор закрыт и на выходе схемы максимальное положительное напряжение $U_{вых} = +E_n$. Таким образом, наличие напряжения $U_{вых}$ соответствует исходному состоянию реле. Для срабатывания реле необходимо, чтобы напряжение базы транзистора VT достигло напряжения срабатывания $U_{с.р.}$, при котором VT открывается и напряжение $U_{вых}$ исчезает. Это произойдет при коротких замыканиях в зоне действия защиты (рис. 3.38, б). В этом случае ток к.з. является рабочим током и в отрицательном напряжении U_1 содержится незначительная переменная составляющая промышленной частоты. Изменяясь во времени, напряжение U_1 остается больше по абсолютному значению напряжения уставки U_y , при котором компаратор переключается и на его выходе напряжение изменяет знак и становится положительным. Оно закрывает диод $VD6$, и конденсатор $C4$ начинает заряжаться через резистор $R14$. Параметры $R14$ и $C4$ выбраны так, что заряд конденсатора до напряжения $U_{с.р.}$ происходит в течение 22 мс. По истечении этого времени транзистор VT открывается, напряжение $U_{вых}$ на его выходе исчезает. Реле срабатывает.

По-иному ведет себя реле при бросках тока намагничивания (рис. 3.38, б). В связи с наличием в напряжении U_1 большой переменной составляющей промышленной частоты это напряжение в некоторые моменты времени становится меньше по абсолютному значению напряжения U_y . При этом на выходе компаратора $A2$ появляются отрицательные сигналы, открывающие диод $VD6$, и конденсатор $C4$ разряжается через резистор $R13$. Таким образом, чередование положительных и отрицательных сигналов напряжения U_2 не позволяет конденсатору $C4$ зарядиться до напряжения $U_{с.р.}$, транзистор VT остается закрытым и реле не срабатывает.

Переменный резистор $R3$ используется для подстройки шкалы уставок, а резистор $R10$ — для ступенчатого изменения порога срабатывания компаратора (U_y), т. е. тока срабатывания реле.

При использовании схемы формирования тормозного сигнала (рис. 3.38, а) получается реле с нелинейной тормозной характери-

стикой (рис. 3.38, в). Напряжение на выходе выпрямителя $VS2$ пропорционально тормозному току $I_{\text{трм}}$. При $I_{\text{трм}} \leq 0,8I_{\text{т.ном}}$ оно меньше напряжения, необходимого для открытия диода $VD10$, и реле не имеет торможения. С ростом $I_{\text{трм}}$ открывается диод $VD10$ и тормозное напряжение подается на вход компаратора $A2$. Оно имеет положительную полярность, как и напряжение на резисторе $R10$, поэтому напряжение уставки U_y (ток срабатывания реле) автоматически увеличивается. Рост тормозного напряжения ограничивает стабилитрон $VD9$ так, что при $I_{\text{трм}} = (7 \dots 14)I_{\text{т.ном}}$ рост тока срабатывания $I_{\text{с.р}}$ прекращается. Коэффициент торможения регулируется дискретно при помощи резистора $R24$.

В заключение следует сказать, что наряду с реле, предназначенным для дифференциальной защиты в устройстве ЯРЭ-2201, отечественная промышленность выпускает дифференциальные реле без торможения типов РСТ-15; РСТ-16. Их схемы во многом аналогичны схеме рассмотренного реле.

Реле сдвига фаз серии РСФ11. Реле применяется в схемах автоматического повторного включения линий электропередачи с двусторонним питанием в качестве органа, контролирующего наличие напряжения на линии и угол сдвига фаз напряжения $\underline{U}_л$ на линии и напряжения $\underline{U}_ш$ на шинах станции или подстанции. Упрощенная схема реле показана на рис. 3.39. Она содержит измерительный и исполнительный орган и блок питания.

Измерительный орган состоит из промежуточного трансформатора напряжения TLV , выпрямителя $VS1$, резисторов $R1-R3$, конденсатора $C1$, стабилитрона $VD1$ и триггера Шмитта, собранного на операционном усилителе $A1$. Промежуточный трансформатор TLV имеет две первичные обмотки с одинаковым числом витков ($w_1 = w_2$). К одной из обмоток (w_1) подводится напряжение линии $\underline{U}_л$, а к другой (w_2) — напряжение шин $\underline{U}_ш$. Обмотки включены встречно, поэтому напряжение вторичной обмотки (w_3) пропорционально модулю разности векторов $\underline{U}_ш$ и $\underline{U}_л$, т. е. его значение зависит от угла δ между векторами напряжений, подводимых к TLV . Оно максимально при $\delta = \pi$ и приближается к нулю при $\delta = 0$, если абсолютные значения сравниваемых напряжений одинаковы. После выпрямления и сглаживания это напряжение подается на инвертирующий вход операционного усилителя $A1$ (напряжение U_n).

Стабилитрон служит для защиты входов $A1$ от больших значений U_n . На неинвертирующем входе с помощью делителя $R3-R5$ устанавливается напряжение $U_{ни}$, соответствующее некоторому

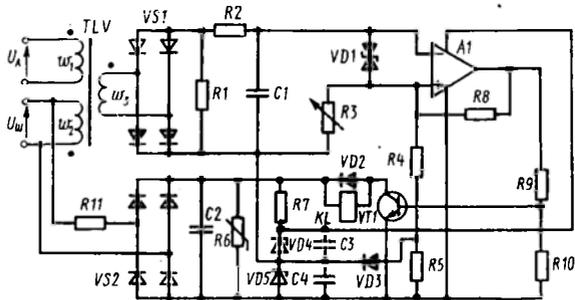


Рис. 3.39. Схема реле сдвига фаз серии РСФ-11

углу уставки δ_y . Реле обеспечивает дискретное изменение уставки через 5° в диапазоне $20-70^\circ$. При $\delta < \delta_y$ напряжение $U_n < U_{ни}$ и на выходе усилителя $A1$ — положительный сигнал. Если $\delta > \delta_y$, то $U_n > U_{ни}$, усилитель переключается и сигнал на его выходе становится отрицательным. Сигнал с выхода усилителя $A1$ подается на базу транзистора $VT1$. В первом случае ($\delta < \delta_y$) транзистор открыт и реле KL срабатывает, а во втором ($\delta > \delta_y$) — закрыт и реле KL находится в исходном состоянии. Транзистор $VT1$, реле KL и диод $VD2$ образуют исполнительный орган.

Блок питания состоит из выпрямителя $VS2$, резисторов $R7$, $R11$, варистора $R6$, конденсаторов $C2-C4$ и стабилитронов $VD4$, $VD5$. Варистор $R6$ предназначен для защиты схемы от перенапряжений, а конденсаторы $C3$ и $C4$ — для повышения помехоустойчивости. Блок питания подключается к трансформатору напряжения, установленному на шинах, и обеспечивает стабилизированным постоянным напряжением $\pm 15 \text{ В} \pm 10 \%$ измерительный орган и нестабилизированным постоянным напряжением исполнительный орган.

§ 3.6. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА

Перспективным направлением в теории и практике релейной защиты, очевидно, является использование специальных цифровых микроЭВМ, разработка на их основе так называемых *программных защит*. Такая возможность объясняется тем, что релейную защиту можно представить как систему арифметико-логического преобразования информации, содержащейся в воздействующих величинах, а сам процесс преобразования описать аналитическими выражениями, являющимися алгоритмом функционирования защиты. Основные элементы микроЭВМ — запоминающие устройства, микропроцессор и устройства ввода/вывода.

В запоминающих устройствах хранится программа расчетов по алгоритмам релейной защиты. В соответствии с этой программой микропроцессор выполняет арифметические и логические операции над поступающими на его вход сигналами, представленными в двоичных кодах, т. е. принимающими всего два значения: 0 и 1. Для выполнения этих операций микропроцессор содержит триггеры, логические элементы И, ИЛИ, НЕ, т. е. представляет собой универсальную цифровую интегральную микросхему. Чтобы записать десятичное число в двоичной системе счисления, необходимо представить его в виде суммы степеней двойки (основания системы счисления). Так, для числа 11, например, эта сумма содержит

$$1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0.$$

Числа при основании называются *разрядными коэффициентами*.

Выписывая их в порядке убывания степени, получим четырехрядное число 1011.

Устройства ввода/вывода осуществляют связь между микропроцессором и внешними для микроЭВМ устройствами программной защиты. Так как в микроЭВМ информация должна поступать в цифровом виде (0 или 1), то внешние устройства на входе микроЭВМ содержат аналого-цифровые преобразователи (АЦП на рис. 3.40), которые преобразуют аналоговые сигналы

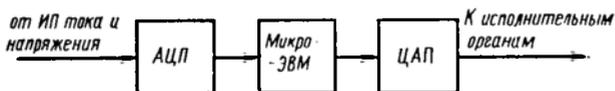


Рис. 3.40. Упрощенная структурная схема программной защиты

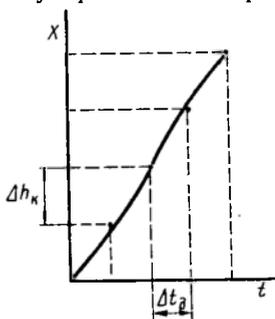


Рис. 3.41. Дискретизация и квантование входной величины

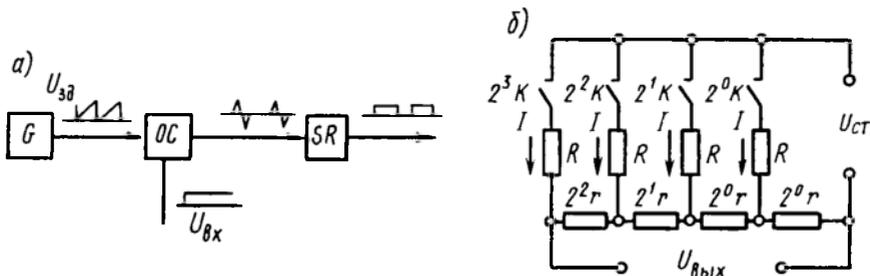


Рис. 3.42. Функциональная схема преобразования аналоговой величины во время-импульсные сигналы (а) и простейшая схема цифро-аналогового преобразователя двоичного четырехразрядного кода в напряжение (б)

измерительных преобразователей тока и напряжения в цифровые. В процессе преобразования входная воздействующая величина X дискретизируется по времени и квантуется по уровню (рис. 3.41). Следует сказать, что шаг дискретизации Δt_d влияет на быстродействие самой микроЭВМ и защиты в целом, а шаг квантования Δh_k определяет точность представления в двоичном коде значения входной воздействующей величины. На рис. 3.42, а показана одна из функциональных схем, используемых в АЦП для преобразования аналоговой величины $U_{вх}$ во время-импульсные сигналы. Напряжение $U_{вх}$ сравнивается с напряжением пилообразной формы $U_{зд}$, источником которого является генератор G . Орган сравнения $ОС$ фиксирует момент равенства этих напряжений, при этом на его выходе появляется кратковременный импульс, который можно

использовать для переключения, например, триггера SR из одного устойчивого состояния в другое. С изменением значения напряжения $U_{вх}$ частота кратковременных импульсов меняется так, что на выходе триггера появляются сигналы прямоугольной формы, продолжительность которых пропорциональна $U_{вх}$. Простейшим аналого-цифровым преобразователем является компаратор. Для исполнительных органов защиты необходимы аналоговые сигналы, поэтому внешние устройства на выходе микроЭВМ содержат цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП на рис. 3.40). На рис. 3.42, б показана одна из возможных схем цифро-аналогового преобразователя двоичного четырехразрядного кода в напряжение. Такой преобразователь действует по принципу суммирования напряжений, пропорциональных «весам» разрядов кодов. К схеме подано стабилизированное напряжение $U_{ст}$. Сопротивления резисторов r относятся между собой, как «веса» разрядов двоичного кода. Значение напряжения на выходе преобразователя $U_{вых}$ зависит от положения ключей K . Так, например, если замкнут ключ 2^3K , то

$$U_{вых} = 1(2^2r + 2^1r + 2^0r + 2^0r) = 2^3/r,$$

т. е. напряжение $U_{вых}$ оказывается пропорциональным высшему (первому) разряду двоичного четырехразрядного кода. При замыкании ключа 2^0K напряжение $U_{вых}$ принимает значение, пропорциональное низшему разряду кода ($2^0/r$). Возможны 16 различных комбинаций положения ключей, им соответствуют 16 значений выходного напряжения, пропорциональных «весам» разрядов преобразуемого кода. Такое изменение значения выходного напряжения возможно при условии равенства токов в цепях резисторов R . Для достижения этого принимают $R \gg r$.

Ключи в схеме преобразователя выполняются на основе полупроводниковых элементов. Управляют ключами триггеры, каждый из которых отвечает соответствующему разряду двоичного числа. Если, например, поступает кодовая комбинация 0110, то приходят в действие триггеры, включающие ключи 2^2K и 2^1K . При этом на выходе преобразователя появляется напряжение, пропорциональное сумме $0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0$, т. е. $U_{вых} = 6/r$. Таким образом, код преобразуется в соответствующую аналоговую величину напряжения. Промышленность выпускает различные ЦАП на основе интегральных микросхем.

Измерительные органы защиты, как и измерительные органы, выполненные на электромеханической и полупроводниковой элементной базе, формируют и сравнивают сформированные величины. Но процесс этот имеет свои особенности, обусловленные тем, что информация о значениях входных воздействующих величин поступает в микроЭВМ в виде дискретных сигналов, соответствующих мгновенным значениям входных величин. В процессе формирования микроЭВМ производит над ними арифметические

операции сложения, вычитания, умножения и деления. В измерительных органах с одной входной величиной, например в реле максимального тока, сравнение величин наиболее просто осуществляется путем контроля интервала времени, в течение которого мгновенные значения тока превышают значение срабатывания. В измерительных органах программных защит используются также интегральные значения входных воздействующих величин, соответствующих средним значениям, полученным в дискретные моменты времени. Функциональные возможности микроЭВМ позволяют выполнить измерительные органы и защиту любой сложности. Это одно из достоинств программных защит. Другим их достоинством является возможность более широкого применения автоматического тестового контроля. Это особенно важно, так как микропроцессорная элементная база пока имеет относительно низкую надежность, обусловленную наличием кроме устойчивых отказов также довольно частых самоустраивающихся сбоев, что приводит к более частым отказам функционирования. Автоматический тестовый контроль предупреждает возможные излишние срабатывания и отказы срабатывания. Число ложных срабатываний можно сократить резервированием отдельных элементов устройства. Однако это приводит к усложнению аппаратуры защиты. Исследования в области программных защит и их практическая реализация пока находятся на стадии отдельных разработок, однако уже теперь очевидны большие возможности микропроцессорной элементной базы для целей релейной защиты [10].

Глава 4

ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

§ 4.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ, ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЛЕ

Плавкие предохранители. Наиболее распространенным электротепловым элементом, используемым в устройствах защиты, является *плавкая вставка — измерительная часть плавкого предохранителя*. Широкое применение плавкие предохранители получили в городских и сельских электрических сетях, на электрических станциях и промышленных предприятиях для защиты линий и потребителей электроэнергии напряжением до 1 кВ. Продолжают совершенствоваться предохранители для защиты элементов систем электроснабжения напряжением 6, 10, 35, 110 кВ, ведутся работы по созданию самовосстанавливающихся предохранителей с жидкотеталлической плавкой вставкой [33, 34].

Защита плавкими предохранителями эффективна только в том случае, если плавкая вставка расплавляется прежде, чем температура защищаемого элемента системы электроснабжения достиг-

нет недопустимых значений. Это обеспечивается выбором *защитной характеристики предохранителя*, представляющей собой графическое изображение зависимости полного времени перегорания плавкой вставки (время плавления и время горения дуги) от проходящего через нее тока. Обычно для защиты проводников рекомендуют, чтобы при полуторакратной их перегрузке время перегорания предохранителя не превышало $t_{пр} = 600$ с, а при двукратной перегрузке — 150 с. Для трансформаторов допустимая продолжительность аварийного тока $t_{доп} \leq 1500/k^2$, где k — отношение наибольшего аварийного тока к номинальному току трансформатора.

Время перегорания плавкой вставки зависит от многих факторов: длины, сечения, материала, формы исполнения, окружающих условий. Окружающие условия неопределенны, однако существенно влияют на отвод теплоты от плавкой вставки. Все это затрудняет аналитический расчет защитной характеристики. Все применяемые методы расчета предусматривают различные допущения. Они не позволяют с достаточной достоверностью построить защитную характеристику для всех возможных кратностей тока, поэтому защитные характеристики для каждого типа плавких вставок определяются опытным путем.

Для получения характеристики необходимо сжечь несколько одинаковых плавких вставок, что вносит определенную погрешность. По опытным данным, для некоторых типов предохранителей действительное время их отключения отличается от полученного из защитной характеристики в полтора раза. Кроме того, в процессе эксплуатации плавкая вставка окисляется, ее сечение уменьшается, а защитная характеристика смещается вниз. Таким образом, плавкая вставка постепенно теряет свои защитные качества. Существенный недостаток предохранителя состоит и в том, что не удается получить требуемую защитную характеристику для малых кратностей тока — время перегорания предохранителя оказывается больше допустимого, т. е. предохранитель не защищает установку при перегрузках.

Другими характеристиками предохранителя являются: номинальный ток плавкой вставки $I_{вс.ном}$; номинальный ток предохранителя $I_{пр.ном}$; номинальное напряжение предохранителя $U_{пр.ном}$; номинальный ток отключения предохранителя $I_{пр.откл}$. В нормальном режиме плавкая вставка длительно нагревается током нагрузки. При этом наблюдается установившийся тепловой процесс, при котором начиная с предельной температуры вставки выделяемая в ней теплота полностью отдается окружающей среде и температура плавкой вставки не повышается. Допустимая температура и определяет номинальный ток вставки. *Номинальным током плавкой вставки $I_{вс.ном}$* называется ток, на который рассчитана плавкая вставка для длительной работы ее в нормальном режиме.

Одновременно с нагревом плавкой вставки нагреваются до установившегося состояния и другие элементы предохранителя (пат-

рон, контакты и др.). При этом в нормальном режиме нагрев предохранителя в целом не должен превышать допустимой температуры длительного нагрева. В связи с этим одной из важных характеристик предохранителя является *номинальный ток предохранителя* $I_{\text{пр.ном}}$. Номинальное напряжение предохранителя $U_{\text{пр.ном}}$ определяет конструкцию предохранителя и длину плавкой вставки, являясь одной из основных его характеристик.

В режиме перегрузки или короткого замыкания через плавкую вставку могут проходить токи, значительно большие номинального. При этом плавкая вставка должна перегореть, а предохранитель должен надежно отключить поврежденный участок. Отключающая способность предохранителя характеризуется *номинальным током отключения* $I_{\text{пр.отк}}$, являющимся наибольшим током, при котором предохранитель разрывает цепь без каких-либо повреждений, препятствующих его дальнейшей работе после смены плавкой вставки. Для быстродействующих предохранителей, используемых, например, в цепях силовых полупроводниковых приборов, в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии (МЭК) дополнительно введены следующие характеристики, оценивающие предохранитель как устройство защиты [35]: преддуговое время $t_{\text{прд}}$; время дуги $t_{\text{д}}$; время срабатывания $t_{\text{с.п}}$; джоулев интеграл. Под *преддуговым временем* понимают интервал времени между началом возникновения повреждения защищаемого элемента и моментом возникновения дуги, а под *временем дуги* — промежуток времени между моментом появления дуги и моментом ее окончательного погасания. *Время срабатывания* складывается из преддугового времени и времени дуги. *Джоулев интеграл* — это интеграл от квадрата тока в заданном интервале времени

$$\int_0^t i^2 dt.$$

В связи с таким определением различают преддуговой джоулев интеграл, дуговой джоулев интеграл и джоулев интеграл срабатывания.

Таким образом, предохранитель является *устройством защиты и коммутации*. Его защитные свойства, определяемые защитной характеристикой, не удовлетворяют ряду указанных требований. Отметим, что при перегрузках и коротких замыканиях возможно перегорание предохранителя только в одной фазе. При этом создается опасный неполнофазный режим.

Отключающая способность у существующих предохранителей достаточно высока, и возможности ее дальнейшего повышения еще не исчерпаны, поэтому для усовершенствования предохранителей следует вести работы в направлении повышения их номинального тока отключения.

Как защитное устройство предохранитель принципиально не совершенен, поэтому защитные функции предохранителя, особенно на напряжения 35—110 кВ, следует возложить на более совершенные устройства, например на релейную защиту. Эта идея реализована в *управляемом предохранителе* [36—38]. Для защиты силовых полупроводниковых приборов перспективны *жидкометаллические самовосстанавливающиеся предохранители* (ЖСП). К сожалению, они в нашей стране не выпускаются, поэтому необходимо расширить и ускорить исследования в области ЖСП. Далее даны некоторые сведения о ЖСП и о результатах работы по их созданию.

Электротепловые реле. В релейной защите и автоматике находят применение электротепловые реле, работа которых основана на явлениях выделения теплоты при прохождении электрического тока. В них, в частности, используют биметаллические элементы, которые в зависимости от конструкции реле могут иметь непосредственный, косвенный или комбинированный нагрев.

Защитная характеристика электротеплового реле должна удовлетворять требованиям, предъявляемым к защитным характеристикам предохранителей. Необходимо отметить, что у электротепловых реле она более удовлетворительна при малых кратностях тока, чем у предохранителей. Однако в связи с недостаточным быстродействием электротепловое реле нельзя использовать для защиты от короткого замыкания, так как нагревательные элементы и биметаллический элемент могут сгореть раньше, чем сработает реле. Необходимо или защищать реле, включая последовательно с ним плавкий предохранитель, или, как это выполнено у автоматических выключателей, предусматривать максимальный электромагнитный расцепитель мгновенного действия. Недостатком реле является также зависимость его защитной характеристики от окружающей среды.

Аналитическое выражение защитной характеристики электротеплового реле получить весьма сложно, поэтому в каждом отдельном случае такую характеристику находят опытным путем.

Температурные реле обычно применяются для защиты низковольтных электродвигателей. Измерительной частью реле является встраиваемый в обмотку электродвигателя элемент (датчик), преобразующий температуру нагрева обмотки в дискретный сигнал. Применяются биметаллические элементы и элементы из терморезисторов. Спротивление терморезисторов при определенной температуре изменяется практически скачкообразно (уменьшается или увеличивается в зависимости от типа терморезистора). В температурных реле обычно используют терморезисторы (позисторы), у которых сопротивление возрастает. Так, например, в устройстве защиты АЗП применен позистор, сопротивление которого при допустимых температурах менее 1650 Ом. Если температура превы-

сит заданный уровень, сопротивление позистора увеличивается до 4000 Ом.

§ 4.2. КОНСТРУКЦИИ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ. ЭЛЕКТРОТЕПЛОВЫХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЛЕ

Плавкие предохранители. Существует множество различных конструкций плавких предохранителей, однако по условию гашения электрической дуги их можно разделить на три основные группы: предохранители, гасящие электрическую дугу в воздухе, в газогенерирующей среде и в мелкозернистом песчаном наполнителе. Рассмотрим некоторые из этих конструкций.

Предохранители для установок напряжением до 1 кВ. Широко применяются предохранители ПР-2 с плавкими вставками на номинальный ток $I_{н.ном} = 10 \dots 200$ А (рис. 4.1).

Патрон предохранителя ПР-2 состоит из толстостенной фибровой трубки 1, на концах которой плотно укреплены латунные втулки 2. На втулках имеются колпачки 4, закрепляющие плавкую вставку 3, привинченную к контактным ножам 5. Такая конструкция позволяет легко производить смену плавкой вставки в условиях эксплуата-

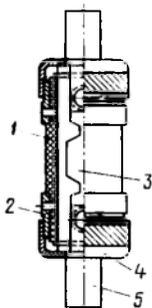


Рис. 4.1. Предохранитель серии ПР-2

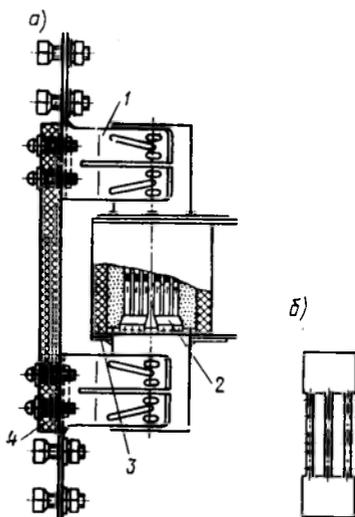


Рис. 4.2. Предохранитель серии ПН-2

ции. Плавкая вставка предохранителя выполнена из листового цинка. Она имеет перешейки, которые облегчают гашение дуги при токах короткого замыкания. Гашению дуги способствует выделение газов фибровой трубкой, которые, поступая в ствол дуги, деионизируют его и создают повышенное давление в патроне. При токах короткого замыкания развивается значительное давление. Отключающая способность предохранителей ПР-2 сравнительно невелика, она не превышает 11 кА. Их допускается применять в небольших, преимущественно передвижных электроустановках.

Более совершенны плавкие предохранители с наполнителем, распространенной серией которых являются предохранители ПН-2 на номинальные токи $I_{нр.ном} = 100 \dots 630$ А и напряжение $U_{нр.ном} = 380 \dots 500$ В. Номинальный ток отключения достигает $I_{нр.откл} = 100$ кА (действующее значение). Предохранитель (рис. 4.2, а) состоит из фарфорового патрона 3, заполненного кварцевым песком (наполнителем), и плавкой вставки 2. Контактные стойки 1 крепятся на изолированном основании 4. Плавкая вставка представляет собой узкие медные

ленты с выштампованными отверстиями (рис. 4.2, б). В середине каждой ленты на широкой части находится оловянный растворитель, ускоряющий процесс плавления вставки. Это делает защитную характеристику более приемлемой при малых кратностях тока (рис. 4.3, а). Наполнитель охлаждает газы, снижает давление внутри патрона, деионизирует ствол дуги при срабатывании предохранителя.

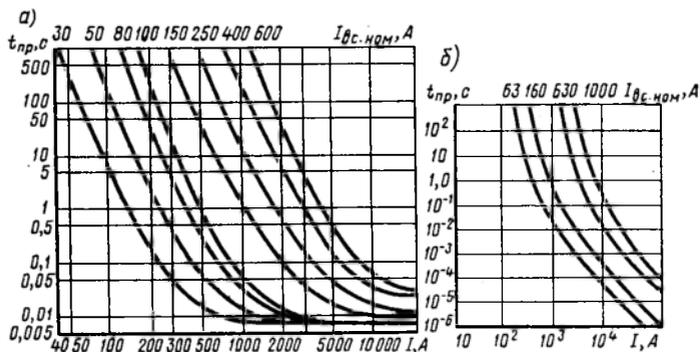


Рис. 4.3. Защитные характеристики предохранителя ПН-2 (а), предохранителя ПП-31 (б)

Предохранитель с наполнителем серии ПП-31 с неразборным патроном имеет некоторые преимущества перед предохранителем ПН-2. Его характеристики соответствуют рекомендациям МЭК 269-1 и РС.СЭВ «Предохранитель», и в них учтены требования публикаций МЭК 144 и РС.СЭВ 235—64. Предохранитель выполняется на номинальный ток $I_{пр,ном} = 32 \dots 1000$ А, номинальное напряжение

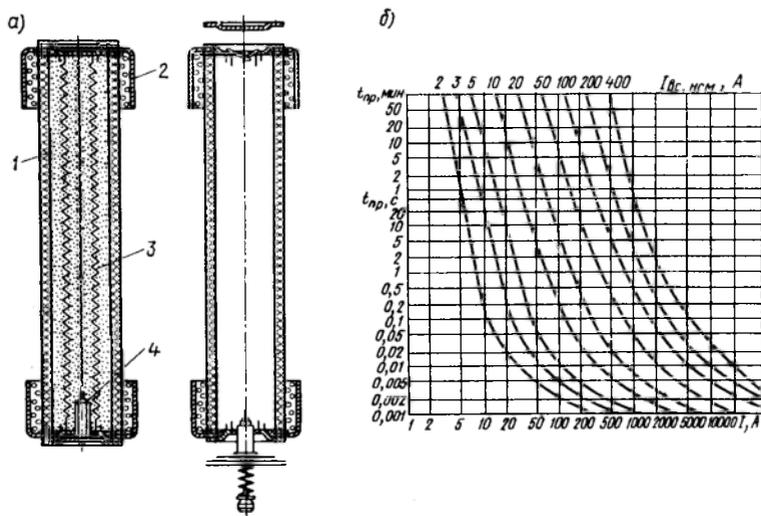


Рис. 4.4. Предохранитель ПКТ (а) и его защитные характеристики (б)

$U_{\text{пр.ном}}=660$ В переменного и $U_{\text{пр.ном}}=440$ В постоянного тока Номинальный ток отключения не менее 100 кА.

Предохранители для установок напряжением выше 1 кВ. Отечественная промышленность выпускает предохранители токоограничивающие ПКТ для закрытых и открытых электроустановок напряжением 3, 6, 10,

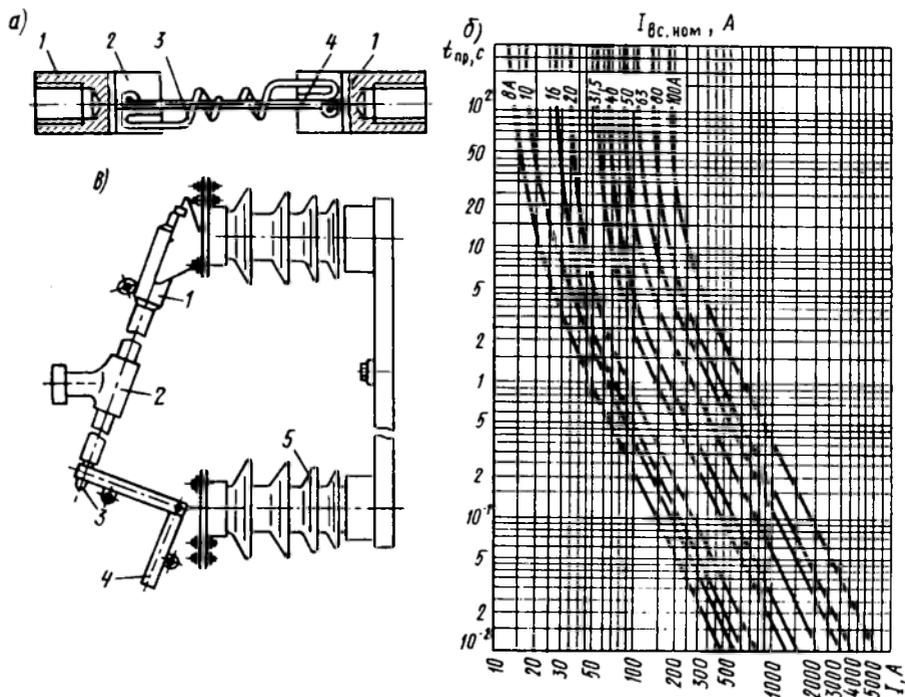


Рис. 4.5. Конструкция заменяемого элемента (а), защитные характеристики предохранителя ПВТ (б) и общий вид предохранителя ПВТ 104-35-100-3,2У1 (в)

20 и 35 кВ (рис. 4.4, а). Патрон предохранителя состоит из фарфоровой трубки 1, плотно закрытой металлическими колпачками 2. Для улучшения условий гашения дуги патрон заполнен мелким кварцевым песком (наполнителем). Плавкая вставка 3 состоит из одного или нескольких параллельно включенных посеребренных медных проводов. Для снижения перенапряжения при отключении провода выполнены из нескольких ступеней различного сечения. На ступени меньшего сечения напаяны оловянные шарики. Это, как и предохранитель ПН-2, делает предохранитель ПКТ чувствительным к токам перегрузки (рис. 4.4, б). В предохранителе используются плавкие вставки с номинальным током $I_{\text{вс. ном}} = 2 \dots 400$ А. Перегорание предохранителя сопровождается срабатыванием указателя 4. Номинальный ток отключения зависит от напряжения электроустановки и изменяется от 40 кА (напряжение 3 кВ) до 8 кА (напряжение 35 кВ).

В настоящее время в сетях напряжением 10, 35 и 110 кВ еще находятся в эксплуатации предохранители типа ПС (предохранители стреляющие). Они сняты с производства, и на их основе выпускаются предохранители выхлопные типов ПВТ 104-10-100-5У1; ПВТ 104-35-100-3,2У1 и ПВТ 104-110-50-2,5У1,

У всех этих предохранителей для дугогасительной камеры использована газогенерирующая винипластовая трубка, внутри которой размещается заменяемый элемент, содержащий плавкую вставку. Конструкция заменяемого элемента (рис. 4.5, а) и защитные характеристики плавких вставок (рис. 4.5, б) едины для всех предохранителей, а конструкции камер гашения и механическая часть различны. Заменяемый элемент выполнен по разработкам НИИ ПО «Урал-электротяжмаш» и Ульяновского политехнического института [39]. Он состоит из двух медных держателей 1, в их пазах 2 запрессованы плавкая вставка 3 и натяжной элемент 4. Плавкая вставка из электротехнической меди выполнена в виде спирали, а натяжной элемент — из нихромовой проволоки. Он необходим для разгрузки плавкой вставки от воздействия отключающей пружины предохранителя. Оловянное покрытие защищает заменяемый элемент от коррозии.

Общий вид предохранителя ПВТ 104-35-100-3,2У1 для сетей напряжением 35 кВ, созданного с использованием разработок Ульяновского политехнического института, показан на рис. 4.5, в. Патрон предохранителя состоит из соединенных между собой корпуса 1, выполненного из винипластовой трубки, и патрубка 2, создающего поперечное дутье. Патрон образует дугогасительную камеру, внутри которой расположены заменяемый элемент, гибкая токоведущая связь и отключающая пружина. При перегорании заменяемого элемента контактный нож 4 под действием собственной пружины тянет за собой гибкую связь 3.

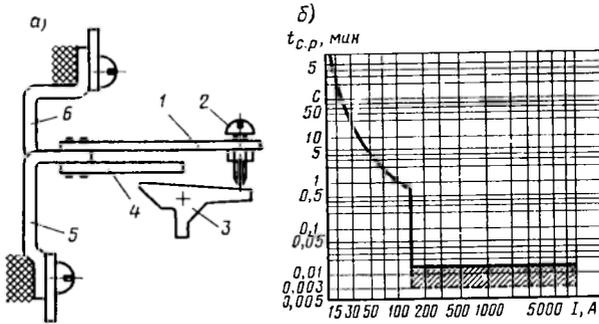


Рис. 4.6. Термобиметаллический расцепитель автоматического выключателя АЗ100

Электрическая дуга, возникающая на месте перегорания заменяемого элемента, вызывает выделение газа из стенок винипластового корпуса 1. Давление в камере гашения повышается и создается продольно-поперечное дутье, гасящее дугу. Для повышения давления в камере при гашении дуги с малыми токами в патрубке 2 предусмотрен медный клапан, закрывающий поперечное дутьевое отверстие патрубка. При гашении больших токов короткого замыкания дуга развивается интенсивно, давление в дугогасительной камере быстро возрастает и выбрасывает клапан, закрывающий отверстие патрубка. Предохранитель способен отключить токи $I_{пр. откл} = 0,015 \dots 3,2$ кА.

Электротепловые реле. Разновидностью электротепловых реле является термобиметаллический расцепитель автоматического выключателя АЗ100 (рис. 4.6, а). Биметаллический элемент реле 1 имеет форму полукольца с выступом, на котором расположен установочный винт 2. Элемент соединен заклепками с токоведущими шинами 5 и 6. Параллельно биметаллическому элементу подключен нагреватель 4. Наличие нагревателя позволяет увеличить выдержки времени реле $t_{c.p}$ при перегрузках (рис. 4.6, б). Расцепитель действует следующим образом. При перегрузке термобиметаллический элемент прогибается под дейст-

вием теплоты, выделяемой непосредственно в нем и в нагревателе. Установочный винт 2 воздвигает на рейку 3, которая, поворачиваясь, освобождает удерживающие рычаги механизма свободного расцепления и под действием пружин автоматический выключатель отключается.

Температурные реле. Реле встраиваются в обмотки машин, температуру которых они контролируют. В качестве примера рассмотрим реле, предназначенное для защиты от недопустимого нагрева изоляции статорных обмоток взрывобезопасных асинхронных электродвигателей. Измерительной частью реле является термодатчик ДТР-ЗМУ(Т) (рис. 4.7), а исполнительным элементом служит электромеханическое промежуточное реле. Термодатчик состоит из теплоизоляционного корпуса 1, теплопроводящей крышки 2 с укрепленными на ней упругой пластиной 3 и биметаллической пластиной 4, а также контактной группы 5, в состав которой входят биметаллические пластины 6 и 7, контакты 8 и 9, пружина 10 и электроизоляционная прокладка 11.

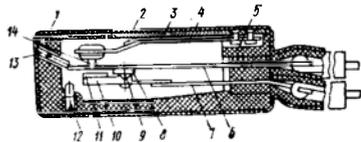


Рис. 4.7. Измерительная часть температурного реле термодатчика ДТР-ЗМУ (Т)

Для ограничения перемещения конца биметаллической пластины 6 в заданных пределах при повышении или понижении температуры служат винты 12 и 13. Винтом 12 устанавливается уставка срабатывания. На конце биметаллической пластины 4 размещается регулировочный винт 14 для регулировки чувствительности термодатчика к скорости роста температуры.

Реле действует следующим образом. При продолжительных небольших перегрузках электродвигателя температура в его обмотках растет медленно и биметаллические пластины, изгибаясь равномерно, перемещаются вниз. Когда температура достигнет значения температуры срабатывания, биметаллическая пластина 6 упрется в винт 12, а биметаллическая пластина 4 будет продолжать перемещаться вниз, размыкая контакты 8 и 9. При быстром росте температуры степень изгиба пластины 4 и 6 различна. В этом случае контакты размыкаются независимо от стопорения пластины 6 винтом 12.

§ 4.3. УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Предохранитель выполняет функции коммутационного аппарата, заменяя выключатель, и защитного устройства, заменяя устройство простейшей (токовой) релейной защиты. Во всех случаях, когда предохранитель может успешно выполнить указанные функции, его рекомендуется применять, так как он значительно дешевле выключателя и релейной защиты, вместе взятых. Область применения предохранителя ограничена главным образом его недостатками как защитного устройства, поэтому целесообразно использовать предохранитель как коммутационный аппарат, управляемый устройствами релейной защиты.

Принципы управления предохранителями рассмотрены в [36]. В настоящее время имеются разработки, позволяющие создать управляемые предохранители на напряжения до 110 кВ. Отечественная промышленность в свое время освоила выпуск аппарата УПС-35У1, предназначенного для защиты понижающих трансформаторов 35/6—10 кВ мощностью 6,3 МВ·А [41, 42]. Конструкции управляемых предохранителей многообразны, но все они выполнены на основе принципа механического разрыва токоведущей цепи пре-

дохранителя по сигналу релейной защиты. В одних конструкциях разрывается или разрезается сама плавкая вставка, в других — размыкается контакт, включенный последовательно с плавкой вставкой. Ниже рассмотрены некоторые из этих конструкций.

Управляемый предохранитель напряжением до 1 кВ. Он выполнен на основе предохранителя ПН-2 [43]. Устройство (рис. 4.8) состоит из ленточной плавкой вставки 1, концы которой зажимаются между контактным ножом 2 и стальной пластинкой (режущим ножом) 3. Плавкая вставка проходит через

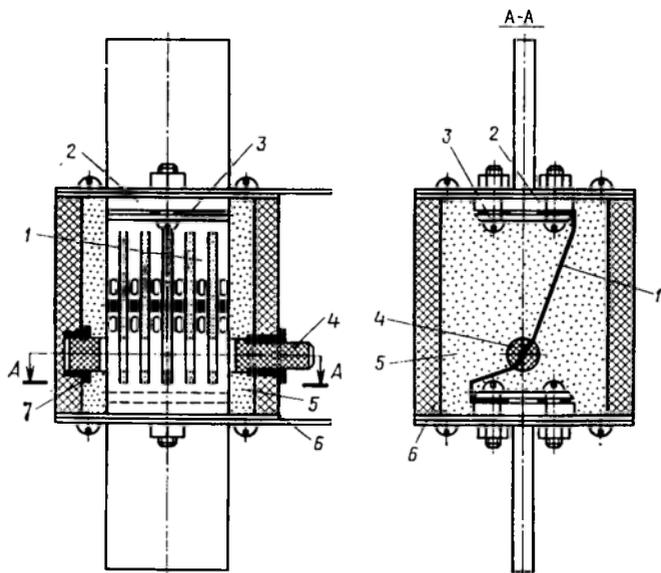


Рис. 4.8. Управляемый предохранитель напряжением до 1 кВ

прорезь во втулке из диэлектрического материала, соединенной с механическим приводом (привод не показан). Для обеспечения герметизации и предотвращения попадания частиц кварцевого песка 5 в зазор между втулкой и патроном предохранителя 6 предусмотрены уплотнения 7.

При перегрузке защищаемого элемента срабатывает устройство релейной защиты и приходит в действие привод; связанная с ним втулка 4 поворачивается и натягивает плавкую вставку 1. Режущие ножи 3 врезаются в плавкую вставку и разрывают ее. Возникшая дуга гаснет и происходит отключение в соответствии с характеристикой релейной защиты. При коротком замыкании управляемый предохранитель работает как обычный, так как его плавкая вставка сгорает раньше, чем сработает релейная защита и подействует привод.

Управляемый предохранитель на основе кварцевого предохранителя ПКТ [44]. В этом устройстве объединены плавкая вставка и биметаллический элемент. При перегрузках защитная характеристика определяется биметаллическим элементом, а при коротких замыканиях — плавкой вставкой. В контактный колпак (рис. 4.9, а), состоящий из контактного кольца 1 и крышки 4, помещается изоляционный диск 13, имеющий отверстия 2 для прохождения плавких вставок 19. На изоляционный диск 13 крепится с помощью токопроводящей шпиль-

ки 8 и гаек 3 биметаллическая мембрана 7. В изоляционном кольце 10 имеются отверстия для неподвижных контактов 5 и пружины 6, количество которых соответствует количеству элементов плавкой вставки 19. Пружины 6 обеспечивают малое переходное сопротивление между неподвижными контактами 5 и мембраной 7. Контакты 5 соединяются с элементами плавкой вставки 19 проводниками 9. Контактная шайба 11 образует искровой промежуток 14 с элементами плавкой вставки 19. Стальной проводник 15, удерживающий указатель срабатывания, присоединяется к токоведущей шпильке 8. Крышка 4 крепится к контактному кольцу 1 болтами 12. Предохранитель содержит патрон 16, указатель срабатывания 18 и крышку 17, закрывающую отверстие для засыпки патрона предохранителя песком.

В нормальном режиме ток проходит через контактную шайбу 11, шпильку 8, мембрану 7, неподвижные контакты 5, проводники 9, соединенные параллельно плавкие вставки 19 и стальной проводник 15 (рис. 4.9, б). При токах перегрузки мембрана 7 нагревается до критической температуры и мгновенно переходит из положения I в положение II (рис. 4.9, а), размыкая (контактами 5) цепи плавких вставок (рис. 4.9, б). Ток перегрузки проходит только по стальному проводнику 15, после выгорания которого поочередно пробиваются искровые промежутки 14 и поочередно выгорают плавкие вставки 19. Таким образом, в каждой из плавких вставок проходит весь ток перегрузки, способствуя быстрому ее выгоранию.

В связи с этим защитная характеристика предохранителя при токах перегрузки располагается более полого, чем предохранителя типа ПКТ. При коротком замыкании управляемый предохранитель действует обычным способом. Разработана также конструкция управляемого предохранителя с приводом. При перегрузках предохранитель отключается релейной защитой [45].

Управляемый предохранитель УПС-35У1 содержит контактное устройство, которое разрывает цепь и отключает защищаемый элемент под действием привода при срабатывании релейной защиты. В случае необходимости последовательно с контактом включается плавкая вставка [41, 42]. При коротком замыкании она перегорает раньше, чем срабатывает релейная защита, и действует на отключение электромеханического привода выключателя. В таких случаях управляемый предохранитель работает аналогично обычному предохранителю. Если срабатывает релейная защита, то под действием расцепителя освобождается вал 4 (рис. 4.10). При этом жестко связанные между собой изолятор-толкатель 3, контактный нож 2 и гибкая связь перемещаются вниз и контактная система, расположенная внутри патрона 1, размыкается. Возникшая электрическая дуга гасится. Условия гашения в основном аналогичны условиям гашения при перегорании плавкой вставки. При наличии контактного устройства и плавкой вставки номинальный ток управляемого предохранителя $I_{пр.ном} = 50$ А. Предохранитель отключает токи $I_{пр.откл} = 0,015 \dots 1,6$ кА. Отсутствие плавкой вставки исключает дополнительный подогрев предохранителя. При этом номинальный ток можно повысить до $I_{пр.ном} = 130$ А, а отключаемый номинальный ток — до $I_{пр.откл} = 2$ кА.

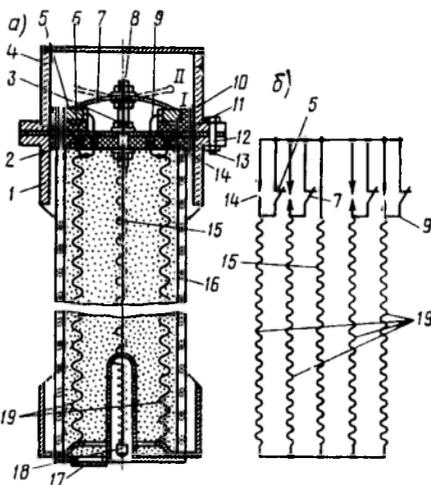


Рис. 4.9. Управляемый предохранитель, выполненный на основе предохранителя ПКТ

Управляемый предохранитель напряжением 110 кВ. Разработано несколько конструкций управляемого предохранителя, в том числе со светооптической системой управления [46, 47]. Однако и в этих конструкциях предполагается использование высоковольтных трансформаторов тока для подключения устройств релейной защиты, а электромеханический привод оказывается довольно громоздким и несовершенным. Это, безусловно, вызывает усложнение и удорожание распределительного устройства и, как следствие, резкое снижение надежности и экономической эффективности предохранителей, управляемых релейной защитой [48]. Конструкция управляемого предохранителя упрощается, если устройство релейной защиты и электромагнит отключения расположить непосредственно на каждом полюсе предохранителя. При этом отпадает необходимость иметь привод, а в качестве первичных измерительных преобразователей тока можно использовать низковольтные трансформаторы тока.

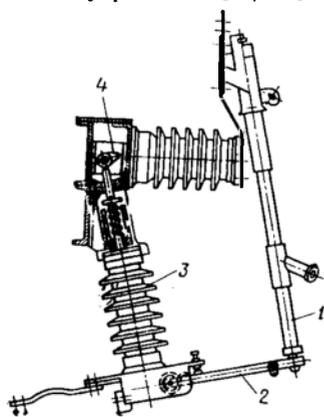


Рис. 4.10 Управляемый предохранитель УПС-35У1

Такой предохранитель с трехступенчатой токовой защитой на микрорелейной элементной базе разработан Ульяновским политехническим институтом в сотрудничестве с НИИ ПО «Уралэлектротяжмаш». Конструкция патрона предохранителя с дугогасительной камерой из винилпластовой трубки показана на рис. 4.11. При подаче сигнала от устройства релейной защиты на электромагнит отключения 16 гибкая тяга 13 с клиновидным упором 11 перемещается вверх, преодолевая сопротивление пружины 12, при этом шарик 6 выходит из сферической выемки нижнего конца контакта 10 и контактное устройство, состоящее из верхнего основания цилиндрической части розеточного контакта 5 и нижнего конца контакта 10, размыкается под действием пружины 15. Возникшая электрическая дуга гасится, как у обычного выхлопного предохранителя. (В распределительном устройстве предохранитель устанавливается вертикально.)

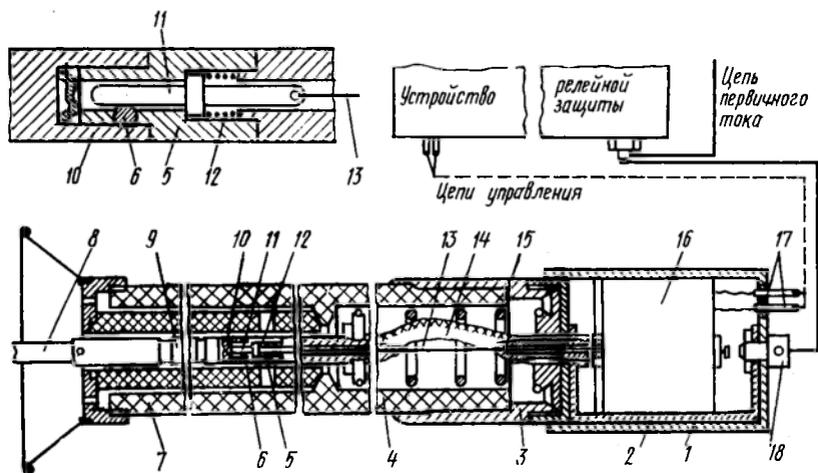


Рис. 4.11. Управляемый предохранитель напряжением 110 кВ

§ 4.4. ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Одним из основных недостатков плавких предохранителей, в том числе и управляемых, является однократность действия, поэтому исследования, связанные с созданием предохранителей многократного действия, являются актуальными и имеют большое народнохозяйственное значение. Для выполнения такого предохранителя можно использовать плавкую вставку из жидкого металла. Под действием тока повреждения жидкий металл испаряется, вызывая взрывообразное повышение давления в дугогасительной камере. При повышенном давлении пары металла обладают значительным сопротивлением, поэтому аварийный ток резко ограничивается, а возникшая дуга гасится. После остывания и конденсации паров металла цепь плавкой вставки самопроизвольно восстанавливается. Время восстановления не превышает 2—4 мс. При непреходящем коротком замыкании жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель (ЖСП) будет многократно отключать и повторно включать защищаемый элемент. Такое действие нежелательно. Его можно избежать при использовании ЖСП с другим коммутационным аппаратом, отключающим защищаемый элемент при срабатывании предохранителя. Имеются также конструкции ЖСП, позволяющие управлять процессом восстановления плавкой вставки. Хорошие токоограничивающие способности, возможность многократно самовосстанавливаться и осуществлять АПВ — бесспорные преимущества ЖСП перед обычным плавким предохранителем. У ЖСП дугогасительной камерой является диэлектрическая втулка. Жидкометаллическая плавкая вставка герметизирована в канале этой втулки. Это исключает окисление плавкой вставки и способствует стабилизации ее защитной характеристики, что, в свою очередь, позволяет значительно увеличить срок службы ЖСП и приблизить номинальный ток плавкой вставки к значению пограничного тока (максимальный испытательный ток). Для ЖСП отношение пограничного тока к номинальному не превышает 1,1, а для плавких вставок из серебра или меди оно составляет 1,3 и 2 соответственно. В связи с этим ЖСП более пригодны и для защиты от перегрузок, например, силовых полупроводниковых приборов. Первые публикации об опытных образцах ЖСП появились в 1971—1975 гг. Конструкции этих предохранителей разработаны японскими фирмами «Мицубиси», «Тарасаки», американской «Дженерал электрик» и фирмами других стран [49]. В зарубежной практике ЖСП применяется как токоограничивающее устройство совместно с другим коммутационным аппаратом, например автоматическим выключателем для повышения его отключающей способности [50]. Номинальный ток таких аппаратов не превышает 800 А, а отключающая способность достигает 200 кА. Японские фирмы гарантируют срок службы ЖСП не менее 30 лет.

Преимущества ЖСП перед обычными предохранителями могли бы дать значительный технико-экономический эффект в отечественной практике. Однако у нас в стране ЖСП пока не выпускаются и нет, по существу, публикаций, освещающих эту проблему. Некоторый опыт теоретических и экспериментальных исследований ЖСП накоплен в Ульяновском и Самарском политехнических институтах. Такие работы проводились также в МЭИ и некоторых других организациях.

Создание ЖСП в СССР связано с необходимостью решения ряда сложных проблем, важнейшая из которых — выбор материала диэлектрической втулки, способной многократно выдерживать воздействие электрической дуги при срабатывании ЖСП без повреждений и недопустимого износа канала. За рубежом диэлектрическая втулка выполняется из керамики, однако состав зарубежных и отечественных керамических материалов и технология их изготовления, даже при одинаковой основе, отличаются. В связи с этим нельзя без соответствующих исследований использовать для ЖСП отечественную керамику с основой, рекомендуемой в публикациях зарубежных авторов. Кроме керамики могут быть использованы и другие материалы. У нас в стране впервые проблема выбора материала диэлектрической втулки ЖСП была затронута в [51], где на основе экспериментальных исследований показана возможность использования для ЖСП некоторых отечественных материалов в сочетании с такими жидкими металлами, как эвтектика галлия, натрий, калий, ртуть.

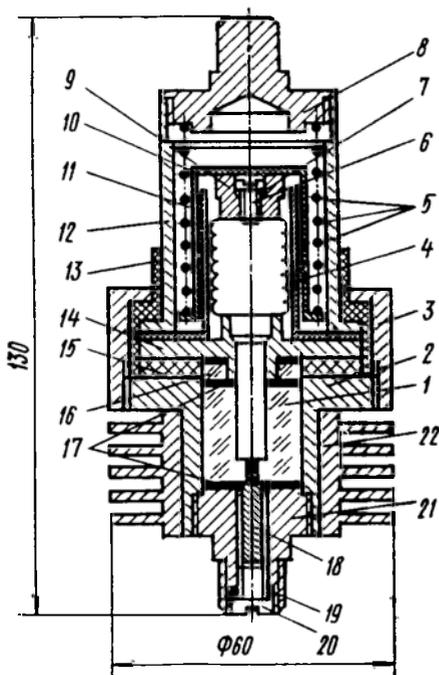


Рис. 4.12. Жидкометаллический самовосстанавливающийся предохранитель

Существенным недостатком ЖСП является увеличение диаметра канала диэлектрической втулки, т. е. сечения плавкой вставки, при многократных срабатываниях предохранителя [52]. При этом увеличиваются пограничный ток и интеграл отключения. Предохранитель может утратить одно из основных своих достоинств — быстродействие. Интенсивность эрозии канала можно ограничить уменьшением энергии электрической дуги при срабатывании предохранителя. Для этой цели японские фирмы предложили, в частности, шунтировать ЖСП низкоомным резистором. С уменьшением его сопротивления условия работы ЖСП улучшаются, так как ток повреждения после срабатывания предохранителя будет проходить в основном через резистор. К сожалению, уменьшение шунтирующего сопротивления сопровождается увеличением тока в защищаемом элементе, что допустимо до определенных пределов. В связи с этим представляет интерес отыскание других способов стабилизации защитной характеристики.

Один из таких способов заключается в следующем. Канал с одного из

горцов диэлектрической втулки выполняют суженным. Сюда помещают твердо-металлический высокоомный электрод. Он образует участок плавкой вставки с повышенным по отношению к жидкому металлу сопротивлением. Испарение жидкого металла и разрыв электрической цепи с последующим гашением электрической дуги всегда происходят в месте соприкосновения электрода с жидким металлом. При этом значение преддугового интеграла будет определяться временем нагрева электрода до температуры кипения жидкого металла и площадью соприкосновения электрода и жидкого металла. Эта площадь определяется диаметром электрода и не изменяется при изменении диаметра жидкометаллической части плавкой вставки в результате дуговой эрозии. Этим достигается постоянство преддугового интеграла при многократных срабатываниях ЖСП и без шунтирования его низкоомным резистором.

На рис. 4.12 показана конструкция такого предохранителя [53, 54]. Он состоит из диэлектрической втулки 1, выполненной из керамики на основе оксида бериллия, ее длина 20 мм. Длина суженной части канала 3 мм, ее диаметр 0,7 мм. Диаметр расширенной части канала равен 3 мм. Диэлектрическая втулка плотно посажена внутрь корпуса 2, на котором расположен радиатор охлаждения 22. Герметичность конструкции обеспечивается путем затяжки резьбовых соединений корпуса и контактного вывода 21 с одной стороны и накидной гайки 3 — с другой. Эластичные герметизирующие прокладки из паронита 17 предотвращают разрушение втулки. Корпус электрически соединен с контактным выводом 21. Второй контактный вывод 8 изолирован посредством втулок 13, 15, 16. Деталь 12 служит корпусом демпфирующего устройства, которое состоит из сильфона 4, соединенного при помощи сварки с металлическим фланцем 14 и заглушкой 9. Направляющая втулка 11 сильфона предотвращает его изгиб и обеспечивает удлинение в осевом направлении. Заправку жидкого металла производят через отверстие в заглушке 9. После заполнения ЖСП жидким металлом отверстие закрывают винтом 6. Герметичность обеспечивается фторопластовыми прокладками 19, 7. Жидкий металл в канале находится под давлением, которое обеспечивается пружиной 5. Усилие пружины передается при помощи стакана 10. Тугоплавкий электрод 18 в суженной части канала втулки фиксируется стопорным винтом 20.

2

РАЗДЕЛ

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

На элементах системы электроснабжения — генераторах, трансформаторах, линиях электропередачи и электродвигателях — применяются токовые, токовые направленные, дистанционные, дифференциальные защиты, а также максимальные и минимальные защиты напряжения. На этих элементах предусматриваются соответствующие устройства автоматики. Релейная защита и автоматика тесно связаны между собой, дополняют друг друга, взаимно влияют на выбор параметров на схемы, имеют общие цепи. Прежде всего это характерно для релейной защиты и устройств АПВ и АВР.

Особенности защищаемого элемента системы электроснабжения, безусловно, влияют на схемы защиты и автоматики, на выбор их параметров, но принципы действия этих устройств остаются неизменными. Поэтому, прежде чем приступить к изучению релейной защиты и автоматики отдельных элементов системы электроснабжения, необходимо познакомиться с принципом действия этих устройств.

Некоторые общие сведения об этом даны во введении. Конкретную реализацию этих принципов целесообразно начать рассматривать применительно к защите и автоматике линий электропередачи. Именно на этом элементе в зависимости от схемы электроснабжения, режима нейтрали и номинального напряжения могут быть использованы любые из названных выше защит и наиболее часто встречающиеся устройства автоматики УАПВ, УАВР, УАЧР. Такой порядок изложения вопросов релейной защиты и автоматики принят в большинстве учебников, и это не случайно, поскольку линия электропередачи как элемент системы электроснабжения позволяет наиболее полно рассмотреть принципы действия и функ-

пии релейной защиты и автоматики, определить основные требования к этим устройствам, обосновать общий подход к выбору их параметров. Эти сведения послужат в дальнейшем основой при изучении релейной защиты и автоматики других элементов систем электроснабжения.

Глава 5 ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

§ 5.1. ОСНОВНЫЕ ОРГАНЫ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Основные параметры и принцип действия токовых защит рассмотрены выше (см. § В.5). Отметим лишь, что в общем случае токовые защиты содержат три ступени, являются относительно селективными и могут осуществлять как ближнее, так и дальнее резервирование. Быстродействующая первая ступень защиты — токовая отсечка без выдержки времени — имеет только измерительный орган, а вторая и третья ступени — токовая отсечка с выдержкой времени и максимальная токовая защита — содержат два органа: измерительный и выдержки времени. Вторую ступень выполняют с пезависимой от тока выдержкой времени, а третью — с независимой и с зависимой. Функции измерительного органа выполняют реле тока *КА*, входящие в измерительную часть схемы. Они реагируют на повреждения или нарушения нормального режима работы и вводят в действие орган выдержки времени, если он имеется. Для повышения чувствительности защиты иногда используют комбинированный измерительный орган, в котором наряду с реле тока имеются реле напряжения *КВ*. В качестве органа выдержки времени можно использовать отдельное реле времени *КТ*. Наряду с этим в одном реле тока могут быть объединены оба органа защиты.

В схемах токовых защит имеются также вспомогательные реле, например промежуточные *КЛ* и указательные *КН*. Вместе с реле времени они образуют логическую часть схемы. Промежуточное реле облегчает работу контактов основных органов защиты и, вводя некоторое замедление, предотвращает действие токовой отсечки без выдержки времени при работе трубчатых разрядников. Указательное реле позволяет контролировать срабатывание защиты. В качестве примера на рис. 5.1 приведена в однофазной изображении принципиальная совмещенная схема максимальной токовой защиты на оперативном постоянном токе. Защита действует на элемент магнит отключения *УАТ* привода выключателя *Q*.

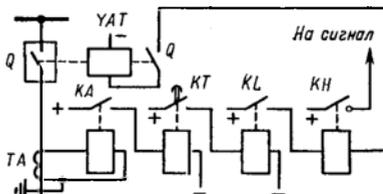


Рис. 5.1. Схема максимальной токовой защиты на постоянном оперативном токе

§ 5.2. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТОКА И ЦЕПЕЙ ТОКА ВТОРИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

В зависимости от назначения защиты и предъявляемых к ней требований применяются следующие схемы соединения измерительных преобразователей и цепей тока измерительных органов:

трехфазная схема соединения в полную звезду;

двухфазная двух- и трехрелейная схема соединения в неполную звезду;

трехфазная схема соединения ТА в полный треугольник, а измерительных органов — в полную звезду;

двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз).

Во всех этих схемах измерительные органы включают на полные токи фаз. Распространение получили также схемы включения на составляющие токов нулевой и обратной последовательности. В этих схемах реле подключается к рассмотренным выше (см. § 1.7) фильтрам тока нулевой и обратной последовательностей. В схемах с включением реле на полные токи фаз токи в реле I_p в общем случае отличаются от вторичных фазных токов $I_{2ф}$ измерительных преобразователей. Это отличие характеризуется коэффициентом схемы $k_{cx}^{(m)} = I_p / I_{2ф}$, который может зависеть от режима работы защищаемого элемента. Если ток $I_{2ф}$ выразить через первичный ток $I_{1ф}$ и коэффициент трансформации K_I измерительного преобразователя, то $k_{cx}^{(m)} = I_p K_I / I_{1ф}$. Это соотношение справедливо также для тока срабатывания реле $I_{c.p}$ и тока срабатывания защиты $I_{c.з}$, т. е. $k_{cx}^{(m)} = I_{c.p} K_I / I_{c.з}$. При определении токов срабатывания обычно рассматривается симметричный режим. В этом случае коэффициент схемы обозначают как $k_{cx}^{(3)}$. Чувствительность токовых защит характеризует коэффициент чувствительности $k_q^{(m)}$ под которым понимают (см. § В.4) отношение тока в реле при металлическом коротком замыкании в конце защищаемой зоны к току срабатывания реле, причем рассматривается к.з. вида m , при котором ток в реле имеет минимальное значение, т. е. $k_q^{(m)} = I_{p\ min}^{(m)} / I_{c.p}$. Коэффициент чувствительности $k_q^{(m)}$ можно выразить через минимальный ток повреждения $I_{k\ min}^{(m)}$, ток срабатывания защиты $I_{c.з}$ и соответствующие коэффициенты схем $k_{cx}^{(m)}$ и $k_{cx}^{(3)}$:

$$k_q^{(m)} = k_{cx}^{(m)} I_{k\ min}^{(m)} / (k_{cx}^{(3)} I_{c.з}). \quad (5.1)$$

Полная погрешность трансформаторов тока в схемах релейной защиты не должна превышать допустимого значения (см. § 1.1). Погрешность определяется, в частности, величиной вторичной нагрузки, которая для каждой схемы соединения зависит от вида короткого замыкания. С увеличением вторичной нагрузки погрешность трансформатора тока возрастает. Поэтому погрешности транс-

форматора тока не должны превышать допустимого значения при том виде к.з., при котором его нагрузка максимальна. В общем случае сопротивление вторичной нагрузки $Z_H = U_2/I_2$, где U_2 — напряжение на выводах вторичной обмотки, а I_2 — вторичный ток трансформатора. Расчет вторичных нагрузок для различных схем дан в [13, 55].

Трехфазная схема с соединением трансформаторов тока и реле в полную звезду. Для выполнения схемы (рис. 5.2, а) необходимы

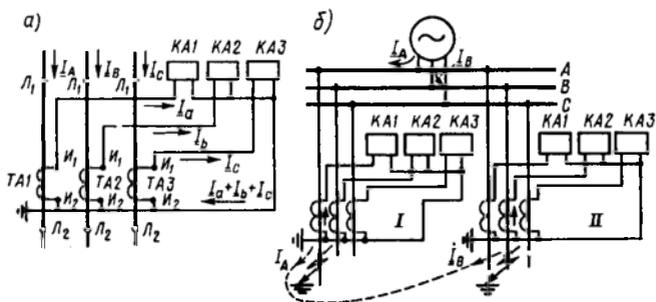


Рис. 5.2. Схема соединения трансформаторов тока и реле в полную звезду (а) и схема сети с двойным замыканием на землю (б)

три реле и три трансформатора тока, установленные во всех фазах защищаемого элемента. Вторичные обмотки трансформаторов тока и обмотки реле соединяются в полную звезду. При этом в нулевую точку должны быть объединены одноименные выводы, например концы I_2 вторичных обмоток всех трех трансформаторов тока. Провод, соединяющий нулевую точку трансформаторов тока и нулевую точку обмоток реле, называют *нулевым (обратным)*.

Из анализа схемы следует, что:

при всех видах коротких замыканий токи повреждения проходят во всех или в части реле $KA1 - KA3$, поэтому защита реагирует на все виды коротких замыканий, имея при этом равную чувствительность при одинаковых токах повреждения; токи в реле равны вторичным фазным токам, поэтому коэффициент схемы $k_{сх}^{(m)} = k_{сх}^{(3)} = 1$;

при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралями, если точки замыкания расположены на разных линиях (рис. 5.2, б), могут подействовать на отключение защиты I и II обеих линий при равенстве выдержек времени, что нежелательно;

ток в нулевом проводе равен сумме фазных токов $(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) = 3\underline{I}_0$, поэтому в нормальном режиме и при отсутствии замыкания на землю в нулевом проводе проходит только ток небаланса; возможный обрыв нулевого провода не может повлиять на работу схемы, однако при замыканиях на землю по нулевому проводу проходит ток повреждения — при обрыве нулевого провода ток поврежденной фазы может замыкаться только через вторичные обмотки трансформаторов тока неповрежденных фаз, которые представляют для него очень

большое сопротивление, потому выполнение схемы соединения трансформаторов тока и обмоток реле в полную звезду без нулевого провода недопустимо;

максимальная нагрузка трансформатора тока имеет место при однофазных коротких замыканиях. Этот режим является расчетным при определении допустимой нагрузки $Z_{н.р\text{сч}} = 2R_{пр} + Z_p + R_{кон}$, где $R_{пр}$ — сопротивление провода (прямого или обратного), соединяющего реле с одним из выводов ТА; Z_p — сопротивление обмотки реле; $R_{кон}$ — переходное сопротивление в местах соединений.

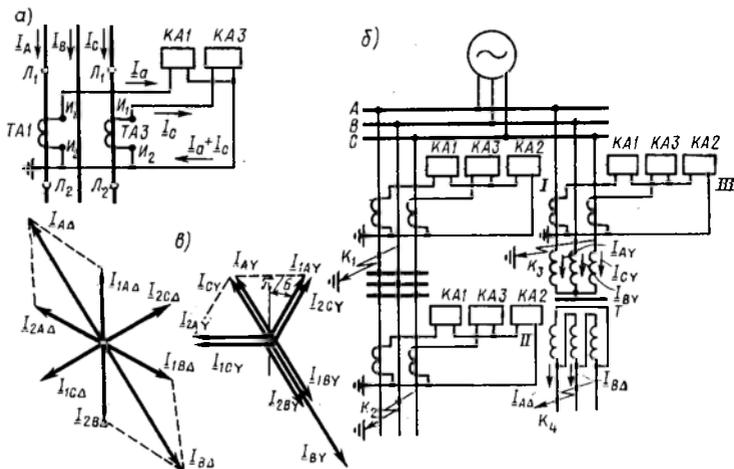


Рис. 5.3. Схема соединения трансформаторов тока и реле в неполную звезду (а) и ее особенности; схема сети с короткими замыканиями (б) и векторная диаграмма токов при к.з. за трансформатором (в)

Двухфазная двух- и трехрелейная схема с соединением трансформаторов тока и реле в неполную звезду. Эту схему (рис. 5.3, а) можно получить из схемы полной звезды (см. рис. 5.2, а), если исключить один из трансформаторов тока (ТА2) и реле КА2 (двухрелейная схема неполной звезды). Обычно для выполнения схемы неполной звезды используются трансформаторы тока, установленные в фазах А и С.

Из анализа этой схемы следует, что:

схема реагирует на все виды коротких замыканий, за исключением короткого замыкания на землю фазы, в которой трансформатор тока не установлен, поэтому схема применяется только для защит, действующих при многофазных повреждениях; в симметричных режимах в реле проходят вторичные фазные токи, поэтому для схемы неполной звезды $k_{сх}^{(m)} = k_{сх}^{(3)} = 1$;

ток в обратном проводе проходит не только при некоторых замыканиях на землю, но и при многофазных коротких замыканиях, а также при нормальном режиме, поэтому обратный провод необходим для правильной работы схемы, т. е. выполнять схему без обратного провода недопустимо;

в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью (рис. 5.3, б) при двойных замыканиях на землю, когда точки повреждения находятся на двух линиях, отходящих от общих шин, причем одна из точек расположена на фазе без трансформатора тока (точки K_1 и K_3), дей-

вует на отключение только защита I и отключается линия с местом повреждения в точке K_1 ; при установке трансформаторов тока в одноименных фазах на всех присоединенных данного напряжения в большинстве ($2/3$) случаев двойных замыканий на землю отключается только одно место повреждения;

в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью при двойных замыканиях на землю защита может действовать неселективно, если точки повреждения K_1 и K_2 располагаются на смежных участках, причем на более удаленном участке повреждается фаза без трансформатора тока (на отключение действует защита I, а не II);

чувствительность защиты может оказаться в два раза меньшей по сравнению со схемой полной звезды при некоторых двухфазных коротких замыканиях за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ или Δ/Y (точка K_4 , защита III).

На рис. 5.3, в приведены векторные диаграммы токов в фазах со стороны обмоток силового трансформатора T , соединенных в Δ и Y (соответственно $I_{A\Delta}$, $I_{B\Delta}$ и I_{AY} , I_{BY} , I_{CY}) при двухфазном коротком замыкании за трансформатором между фазами A и B . Векторные диаграммы токов построены с использованием метода симметричных составляющих. Полные токи в фазах можно выразить через ток прямой последовательности фазы A со стороны треугольника:

$$\begin{aligned} I_{A\Delta} &= -I_{B\Delta} = I_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{3} I_{1A\Delta} e^{j\pi/6}, \\ I_{AY} &= I_{CY} = -I_{BY}/2 = (I_{1A\Delta}/n_T) e^{j\pi/6}, \end{aligned}$$

где n_T — коэффициент трансформации силового трансформатора.

Отсюда

$$I_{AY} = I_{CY} = I_{\kappa}^{(2)}/(\sqrt{3} n_T).$$

Чувствительность защиты, выполняемой по схеме неполной звезды, в данном случае определяется токами I_{AY} и I_{CY} :

$$k_{\text{ч}}^{(2)} = I_{\kappa}^{(2)}/(\sqrt{3} I_{\text{с.з}} n_T),$$

а защиты, осуществляемой по схеме полной звезды, — током I_{BY} :

$$k_{\text{ч}}^{\prime(2)} = 2I_{\kappa}^{(2)}/(\sqrt{3} I_{\text{с.з}} n_T),$$

т. е. $k_{\text{ч}}^{\prime(2)} = 2k_{\text{ч}}^{(2)}$.

Если чувствительность двухрелейной схемы неполной звезды недостаточна, то в обратный провод схемы дополнительно включается реле KA_2 , по обмотке которого, как и в обратном проводе, проходит сумма токов фаз A и C (трехрелейная схема неполной звезды). По чувствительности эта схема равноценна схеме полной звезды.

Двухфазное короткое замыкание за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ является расчетным при определении погрешности TA . В этом случае вторичная нагрузка TA имеет максимальное значение:

$$Z_{\text{н. рсч}} = 3(R_{\text{нр}} + Z_{\rho}) + R_{\text{кон}}.$$

Трехфазная схема соединения TA в полный треугольник, а измерительных органов — в полную звезду (рис. 5.4). В схеме используются три трансформатора тока $TA1$ — $TA3$ и три реле $KA1$, $KA2$, $KA3$. Вторичные обмотки TA соединены в треугольник последовательным соединением разноименных выводов обмоток, а обмотки реле соединены в звезду и с помощью проводов подключаются к вершинам треугольника. При такой схеме соединения

в каждом реле проходит ток, равный геометрической разности токов двух фаз:

$$\underline{I}_{p1} = \underline{I}_a - \underline{I}_b; \quad \underline{I}_{p2} = \underline{I}_b - \underline{I}_c; \quad \underline{I}_{p3} = \underline{I}_c - \underline{I}_a.$$

Из анализа схемы следует, что: схема реагирует на все виды коротких замыканий; соотношения между токами в реле и вторичными фазными токами TA зависят от вида короткого замыкания, поэтому схема имеет различные коэффициенты схемы $k_{cx}^{(m)}$, а именно:

$$k_{cx}^{(3)} = \sqrt{3}; \quad k_{cx}^{(2)} = 2; \quad k_{cx}^{(1)} = 1;$$

так как $k_{cx}^{(m)} \neq k_{cx}^{(3)}$, то защита имеет разную чувствительность.

Из (5.1) следует, что наименьшая чувствительность имеет место при однофазных коротких замыканиях ($k_{cx}^{(1)} = 1$);

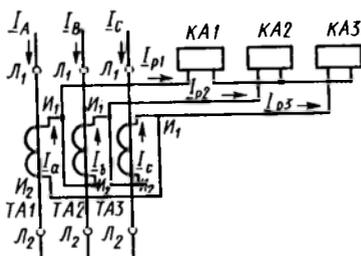


Рис. 5.4. Схема соединения трансформаторов тока в полный треугольник, а измерительных органов — в полную звезду

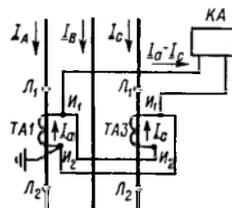


Рис. 5.5. Схема соединения трансформаторов тока и реле на разность токов двух фаз

при коротких замыканиях на землю токи нулевой последовательности не проходят в реле; схема соединения $TA1 - TA3$ в треугольник является как бы комбинированным фильтром токов прямой и обратной последовательности;

максимальная вторичная нагрузка TA имеет место при трехфазных коротких замыканиях, а также при двухфазных повреждениях за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ , $Z_{н.реч} = 3(R_{пр} + Z_p) + R_{кон}$.

Двухфазная однорелейная схема соединения в неполный треугольник (на разность токов двух фаз). Для выполнения схемы вторичные обмотки трансформаторов тока, установленных в двух фазах, соединяются разноименными выводами. К трансформаторам тока реле присоединяется так, что по его обмотке проходит ток, равный геометрической разности фазных токов. В соответствии со схемой (рис. 5.5) $\underline{I}_p = \underline{I}_a - \underline{I}_c$.

Из анализа поведения реле при различных видах короткого замыкания следует, что:

схема защиты реагирует на все виды коротких замыканий, за исключением замыканий на землю фазы, в которой трансформатор тока не установлен, поэтому применяется только для действия при многофазных повреждениях; существенным недостатком схемы является то, что при двухфазном коротком замыкании за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ (точка K_4 на рис. 5.3, б) защита может отказать в действии в связи с тем, что токи в фазах с

трансформаторами тока равны и совпадают по фазе (токи I_{AY} и I_{CY} на рис. 5.3, в);

соотношения между токами в реле и вторичными фазными токами ТА зависят от вида короткого замыкания и сочетания поврежденных фаз, поэтому коэффициент схемы $k_{сх}^{(m)}$ принимает различные значения. В нормальном режиме и при трехфазном коротком замыкании $k_{сх}^{(3)} = \sqrt{3}$. В случае двухфазных повреждений $k_{сх}^{(2)}$ зависит от сочетания поврежденных фаз. Так, при коротком замыкании между фазами А—С коэффициент схемы $k_{сх}^{(2)} = 2$. Защита наименее чувствительна к двухфазным коротким замыканиям между фазами А—В и В—С, когда $k_{сх}^{(2)} = 1$.

расчетным для определения допустимой нагрузки трансформаторов тока является двухфазное короткое замыкание между фазами А—С. В этом случае $Z_{н. р. ч} = 2(2R_{нр} + Z_p) + R_{кон}$.

Рассмотренные схемы соединения вторичных обмоток ТА пригодны для подключения через максиселекторы современных реле, выполненных на основе операционных усилителей (см. § 3.4). При использовании схемы неполного треугольника (рис. 5.5) максиселектор не требуется. Такие защиты называются *односистемными*.

Рассмотренные схемы включения измерительных реле неравноценны как по количеству оборудования, так и по другим параметрам (чувствительность, надежность, селективность и др.). Выбор той или иной схемы определяется в первую очередь назначением защиты. При условии выполнения всех требований, предъявляемых к защите, предпочтительна наиболее простая схема, требующая наименьшего количества оборудования.

В сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью защита, выполненная по схеме полной звезды, может при двойных замыканиях на землю отключить оба места повреждения, что нежелательно, поэтому для отключения многофазных коротких замыканий и ликвидации двойных замыканий на землю в сети с изолированной нейтралью защиту следует выполнять по схеме неполной звезды или по схеме включения реле на разность токов двух фаз.

В сетях с глухозаземленными нейтралью к защите предъявляется требование действовать на отключение защищаемого элемента при коротких замыканиях между фазами и при коротких замыканиях на землю. Такую защиту можно выполнить двумя способами: по схеме включения трансформаторов тока и реле в полную звезду; в виде двух комплектов — одного от междуфазных коротких замыканий с соединением трансформаторов тока и реле в неполную звезду и другого от коротких замыканий на землю с соединением трансформаторов тока в фильтр тока нулевой последовательности.

Как показано ниже (см. § 5.11), реле тока, включенные на ток фазы (схема полной звезды), при коротком замыкании на землю менее чувствительны, чем комплект защиты от замыканий на землю с соединением трансформаторов тока в фильтр тока нулевой последовательности. Кроме того, комплект защиты от коротких за-

мыканий на землю можно выполнить с меньшей выдержкой времени. Поэтому более целесообразно выполнение токовой защиты в виде двух комплектов: от междуфазных коротких замыканий и от коротких замыканий на землю.

Рассмотренные схемы соединения трансформаторов тока и реле используют также в цепях тока других защит (дифференциальной, токовой направленной, дистанционной).

§ 5.3. ПЕРВАЯ СТУПЕНЬ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ — ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА БЕЗ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ

Селективное действие первой ступени токовой защиты (в дальнейшем первую ступень будем называть токовой отсечкой без выдержки времени или просто отсечкой) достигается тем, что ее ток срабатывания принимается большим максимального тока короткого замыкания, проходящего через защиту при повреждении вне защищаемого элемента. Действие защиты при коротком замыкании

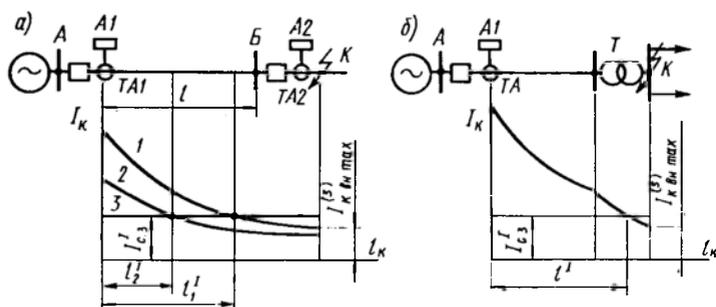


Рис. 5.6. Выбор тока срабатывания и определение защищаемой зоны токовой отсечки без выдержки времени

на защищаемом участке обеспечивается благодаря тому, что ток к. з. в сети, а следовательно, и в защите увеличивается по мере приближения места короткого замыкания к источнику питания (рис. 5.6), причем кривые изменения тока короткого замыкания имеют различную крутизну в зависимости от режима работы системы и вида к.з. (кривые 1 и 2 на рис. 5.6, а соответственно для максимального и минимального режимов).

Для схем с включением реле на полные токи фаз расчетным при выборе тока срабатывания защиты А1 обычно является трехфазное короткое замыкание у шин подстанции В в точке К в максимальном режиме. При этом $I_{с.з.}^I = k_{отс}^I k_{сх}^{(3)} I_{к.вн\ max}^{(3)}$ и ток срабатывания реле

$$I_{с.з.}^I = k_{отс}^I k_{сх}^{(3)} I_{к.вн\ max}^{(3)} / K_I \quad (5.2)$$

Так как токовая отсечка без выдержки времени при внешних коротких замыканиях не срабатывает, коэффициент возврата k_b при выборе тока $I'_{с.з}$ не учитывается. При определении $I'_{с.з}$ необходимо иметь в виду, что отсечка не имеет выдержки времени. Поэтому в выражении (5.2) ток $I^{(3)}_{к.вп\max}$ принимается равным начальному ($t=0$) действующему значению периодической составляющей тока внешнего короткого замыкания. Влияние аperiodической составляющей учитывается коэффициентом отстройки $k'_{отс}$. Ток срабатывания не зависит от режима работы и места повреждения. Отсечка срабатывает, когда ток, проходящий по защищаемой линии AB (рис. 5.6, а), больше или равен току срабатывания защиты, т. е. $I_k \geq I'_{с.з}$. Это условие выполняется при коротком замыкании в пределах участка l_1 (максимальный режим) или участка l_2 (минимальный режим) защищаемой линии.

Таким образом, участки l_1 и l_2 являются зонами, защищаемыми отсечкой. Они определяются точками пересечения кривых изменения тока к. з. 1 и 2 с прямой 3, изображающей ток $I'_{с.з}$; следовательно, отсечка защищает не всю линию, а только некоторую ее часть. Как следует из указанных графиков, защищаемая зона тем больше, чем меньше ток срабатывания и чем больше крутизна кривой изменения тока к.з., которая определяется режимом работы и видом короткого замыкания. Поэтому в зависимости от режима работы и вида короткого замыкания защищаемая зона отсечки изменяется. Чувствительность защиты определяется длиной защищаемой зоны l' и коэффициентом чувствительности $k'_{ч}$. При к. з. у места установки защиты в минимальном режиме $k'_{ч} \geq 2$.

Для увеличения защищаемой зоны и повышения чувствительности защиты коэффициент отстройки $k'_{отс}$ выбирается возможно меньшим. Он определяется погрешностью в расчете тока к. з., погрешностью реле и наличием аperiodической составляющей тока короткого замыкания. Для защиты с электромагнитным реле типа РТ-40 при наличии выходного промежуточного реле принимается $k'_{отс} = 1,2 \dots 1,3$; при использовании отсечек индукционных реле тока РТ-80 $k'_{отс} = 1,5 \dots 1,6$, а для отсечек с реле прямого действия РТМ $k'_{отс} = 1,8 \dots 2,0$.

В рассмотренном случае защищаемая зона охватывает только часть линии и токовую отсечку без выдержки времени нельзя использовать в качестве единственной или основной защиты. Однако в некоторых частных случаях, например, на радиальных линиях, питающих один трансформатор (рис. 5.6, б), с помощью токовой отсечки можно защитить всю линию, если допустить ее срабатывание при повреждении в трансформаторе. В данном случае это является целесообразным. Ток срабатывания при этом выбирается по максимальному току короткого замыкания за трансформатором (точка К). Аналогично можно выбирать ток срабатывания и при наличии нескольких трансформаторов, однако в этом случае возникает необходимость автоматически отключать поврежденный

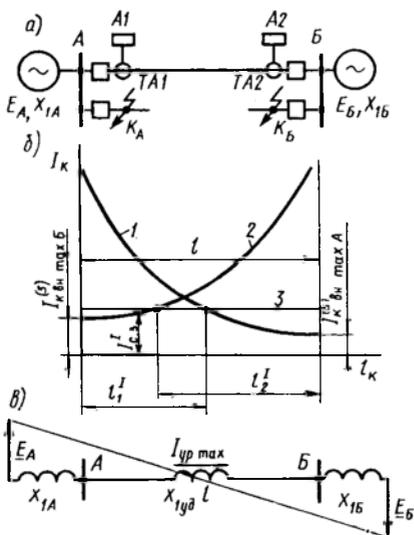


Рис. 5.7. Выбор тока срабатывания токовых отсечек без выдержки времени на линии с двусторонним питанием

ты $A1, A2$ обеих сторон линии не должны срабатывать, т. е. $I^1_{с.з1} = I^1_{с.з2} > I^{(3)}_{к.вн \max A}$. При повреждении в точке K_A по защищаемой линии и через места установки защит от источника B проходит максимальный ток $I^{(3)}_{к.вн \max B}$. При этом защиты также не должны действовать, т. е. $I^1_{с.з} = I^1_{с.з1} = I^1_{с.з2} > I^{(3)}_{к.вн \max B}$. Из двух значений выбирается больший ток срабатывания, что является первым условием его выбора. В данном случае (рис. 5.7, б)

$$I^1_{с.з} = I^1_{с.з1} = I^1_{с.з2} \geq k^1_{отс} I^{(3)}_{к.вн \max B} \quad (5.3)$$

В эксплуатации возможны случаи качаний генераторов источника A относительно генераторов источника B и выхода их из синхронизма. При этом по линии AB могут проходить большие уравнительные токи. Отсечки в этом случае не должны действовать, поэтому

$$I^1_{с.з} = I^1_{с.з1} = I^1_{с.з2} \geq k^1_{отс} I_{ур \max} \quad (5.4)$$

Уравнение (5.4) — это второе условие выбора тока срабатывания отсечек на линиях с двусторонним питанием. Определяющим является условие, которое дает большее значение тока срабатывания.

Максимальный уравнительный ток возникает, когда векторы эк-

трансформатор с последующим включением линии устройством АПВ с целью восстановления питания потребителей.

Токовые отсечки используют также на линиях с двусторонним питанием. В этом случае они устанавливаются с обеих сторон защищаемой линии (защиты $A1$ и $A2$ на рис. 5.7, а). Кривые 1 и 2 (рис. 5.7, б) показывают изменение максимальных токов к.з. соответственно от источников A и B при перемещении короткого замыкания вдоль защищаемой линии. Токи срабатывания отсечек должны быть выбраны таким образом, чтобы при внешних коротких замыканиях (точки K_A и K_B) защиты не действовали.

При повреждении в точке K_B по защищаемой линии и через места установки защит от источника A проходит максимальный ток $I^{(3)}_{к.вн \max A}$. При этом защиты

вивалентных ЭДС E_A и E_B соответственно источников A и B смещены на угол π (рис. 5.7, θ). При этом, принимая $E_A = E_B = E$, ток $I_{ур\max}$ определяют по выражению

$$I_{ур\max} = 2E (X_{1A} + X_{1уд}l + X_{1B}).$$

При определении эквивалентных ЭДС E_A и E_B и приведенных к шинам источников эквивалентных сопротивлений прямой последовательности X_{1A} и X_{1B} систем генераторы вводятся в расчетную схему переходными значениями E'_d и X'_d . При расчете тока, возникающего во время несинхронного АПВ, используются сверхпереходные величины E''_d и X''_d . Защищаемые зоны отсечек l'_1 и l'_2 определяются абсциссами точек пересечения кривых 1 и 2 с прямой 3, соответствующей току срабатывания отсечек. В рассматриваемом случае (рис. 5.7, б) защищаемые зоны перекрывают одна другую. При этом $l'_1 + l'_2 > l$ и повреждения в средней части линии на длине $(l'_1 + l'_2) - l$ отключаются отсечками с двух сторон. При коротких замыканиях на линии вне этой зоны срабатывает только отсечка $A1$ или только отсечка $A2$. С противоположной стороны линия отключается другой защитой.

В некоторых случаях при наличии дополнительной линии связи между источниками A и B отключение защищаемой линии только отсечкой $A1$ или $A2$ может привести к увеличению тока, проходящего по линии. При этом отсечка может отключить линию с другой стороны. Такое поочередное действие защит называется *каскадным*.

§ 5.4. ВТОРАЯ СТУПЕНЬ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ — ТОКОВАЯ ОТСЕЧКА С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ

Основной недостаток токовой отсечки без выдержки времени состоит в том, что она защищает только часть линии. Участок в конце линии за пределами зоны l' остается незащищенным. На рис. 5.8 показана схема сети с двумя последовательно соединенными участками AB и BB , для защиты которых установлены токовые отсечки без выдержки времени A^1I и A^2I с токами срабатывания $I_{с.з.A1}$ и $I_{с.з.A2}$, выбираемыми в соответствии с (5.2). Отсечки имеют защищаемые зоны соответственно l'_{A1} и l'_{A2} , которые охватывают только часть линий. Участки l'' и l''' в конце линий за пределами зон l'_{A1} и l'_{A2} остаются незащищенными. В связи с этим возникает необходимость иметь вторую ступень токовой защиты. Вместе с первой ступенью она должна обеспечить защиту всей линии и шины приемной подстанции.

Выбор параметров второй ступени рассмотрим на примере защиты линии AB (рис. 5.8). Так как вторая ступень A^1I является относительно селективной, в ее действие необходимо ввести выдержку времени. Для исключения излишних срабатываний защиты при коротких замыканиях в зоне l'_{A2} токовой отсечки A^2I ли-

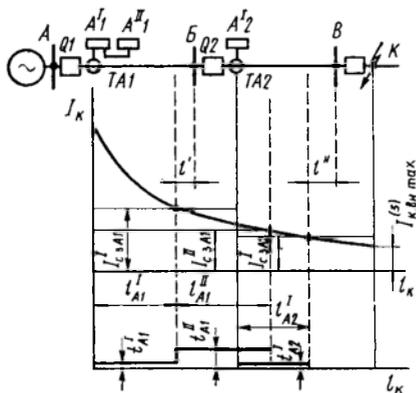


Рис. 5.8. Защищаемые зоны и время действия токовой защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени

l''_{A2} (участок l'') отсечки A^2 линии BB достаточно, чтобы ток срабатывания $I_{с.з. A1}^{I1}$ второй ступени был больше максимального тока к. з., проходящего по линии AB при повреждении в конце защищаемой зоны l''_{A2} отсечки линии BB . Этот ток, как следует из рис. 5.8, равен току срабатывания $I_{с.з. A2}^{I1}$ токовой отсечки A^2 линии BB . Поэтому селективность обеспечивается, если принять

$$I_{с.з. A1}^{I1} = k_{отс}^{I1} I_{с.з. A2}^{I1} \quad (5.5)$$

где $k_{отс}^{I1} = 1,1 \dots 1,05$.

При таком выборе тока срабатывания $I_{с.з. A1}^{I1}$ и выдержки времени $t_{отс}^{I1}$ в зону действия второй ступени защиты линии AB входит участок l' и шины приемной подстанции. Кроме того, она обеспечивает дальнейшее резервирование в случае отказа отсечки A^2 при коротких замыканиях на линии BB вблизи шин подстанции B и ближнее резервирование в случае отказа A^1 первой ступени защиты линии AB . Если выдержка времени второй ступени оказывается приемлемой, то первая ступень может отсутствовать. В общем случае от шин подстанции B отходят несколько линий и, кроме того, к шинам могут быть подключены понижающие трансформаторы. При этом вторая ступень защиты A^1 на подстанции A должна быть отстроена по времени от отсечек всех отходящих линий и от быстродействующих защит трансформаторов, а ее ток срабатывания $I_{с.з. A1}^{I1}$ должен быть выбран по наибольшему из токов к. з., проходящих по линии AB при повреждении в конце защищаемых зон отсечек отходящих линий и при коротком замыкании на шинах низшего напряжения трансформаторов. Чувствительность второй ступени проверяется по минимальному току повреждения при ме-

нии BB выдержка времени должна быть больше времени срабатывания $t_{отс}^{I2}$ этой отсечки на некоторое время Δt , называемое *ступенью селективности*, т. е. должно выполняться условие $t_{отс}^{I1} = t_{отс}^{I2} + \Delta t$. Степень селективности учитывает время отключения $t_{о.в}$ выключателя $Q2$, погрешности во время действия $t_{п1}$ защиты A^1 и $t_{п2}$ защиты A^2 , учитывается также некоторое время запаса $t_{зап}$. С учетом всего этого $\Delta t = t_{о.в} + t_{п1} + t_{п2} + t_{зап}$. В расчетах принимают $\Delta t = 0,3 \dots 0,6$ с, поэтому выдержка времени $t_{отс}^{I1}$ второй ступени обычно не превышает 0,5 с. При этом для сохранения селективности в случае повреждения за пределами зоны

таллическом к.з. в конце защищаемой линии. При этом коэффициент чувствительности должен быть $k_{\tau}^{II} \geq 1,3 \dots 1,5$. Токовая отсечка с выдержкой времени при соответствующем выборе ее параметров сохраняет селективность и на линиях с двусторонним питанием.

§ 5.5. ТРЕТЬЯ СТУПЕНЬ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ — МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Выбор выдержки времени. Как уже отмечалось (см. § В.5), третья ступень токовой защиты, которую принято называть максимальной токовой защитой, может выполняться с независимой и с ограниченно зависимой характеристиками времени срабатывания. И в том, и в другом случае селективность защиты можно обеспечить, если время срабатывания t_1^{III} защиты $A1$ (рис. 5.9), расположенной у источника питания, при коротком замыкании в точ-

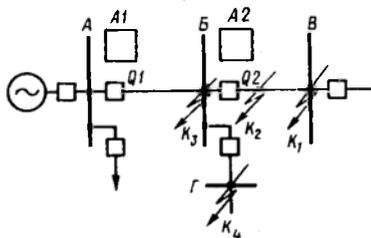


Рис. 5.9. Размещение максимальных токовых защит в радиальной сети с односторонним питанием

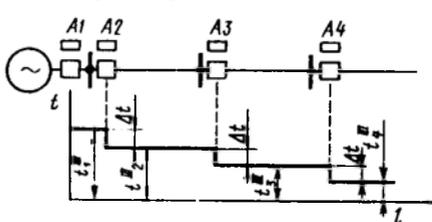


Рис. 5.10. Согласование характеристик максимальных токовых защит с независимой выдержкой времени

ке K_2 на смежном участке в зоне действия защиты $A2$ (линия BB) больше максимальной выдержки времени t_2^{III} защиты $A2$ на ступень селективности $\Delta t = 0,3 \dots 0,5$ с. Если для защиты используют реле РТВ, то ступень селективности увеличивают до 1 с.

Выдержки времени у максимальных токовых защит выбирают по *ступенчатому принципу*: начинают выбор с наиболее удаленного от источника питания элемента и по мере приближения к источнику питания увеличивают ее таким образом, что защита последующего участка имеет выдержку времени на ступень селективности больше, чем максимальная выдержка времени защиты предыдущего участка (рис. 5.10):

$$t_3^{III} = t_4^{III} + \Delta t; \quad t_2^{III} = t_3^{III} + \Delta t; \quad t_1^{III} = t_2^{III} + \Delta t.$$

Выдержки времени у максимальных токовых защит с ограниченно зависимой характеристикой должны выбираться для определенного тока. Из рис. 5.9 очевидно, что наибольший ток к. з., а следовательно, и наибольший ток в реле защиты $A1$ и $A2$ при повреждении в зоне действия защиты $A2$ проходят при коротком замыкании вблизи места установки защиты $A2$ (точка K_2), т. е. у шин

подстанции *Б*. При удалении точки короткого замыкания в направлении подстанции *В* ток повреждения уменьшается, а время срабатывания защит *A1* и *A2* увеличивается. Для двух реле одного типа с разными уставками времени разность Δt выдержек времени при изменении тока не остается постоянной; она тем больше, чем меньше ток в реле (рис. 5.11, *а*). Поэтому необходимо, чтобы условие селективности выполнялось для тока короткого замыкания $I_{к2}^{(3)}$ в точке K_2 .

Характеристику защиты *A1* по заданной характеристике защиты *A2* выбирают следующим образом: строят характеристику выдержек времени защиты

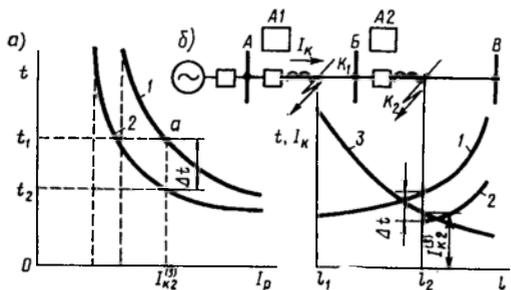


Рис. 5.11. Характеристики максимальных токовых защит с ограниченно зависимой выдержкой времени

A2 в зависимости от абсолютного значения тока в обмотке реле; по построенной характеристике определяют время срабатывания защиты *A2* при токе к. з. $I_{к2}^{(3)}$ в расчетной точке (точка K_2); прибавив к этому времени ступень селективности, определяют время срабатывания защиты *A1* и точку *а* (рис. 5.11, *а*), принадлежащую характеристике защиты;

по току срабатывания и точке *а* выбирают характеристику реле по типовым характеристикам.

На рис. 5.11, *б* показано изменение тока повреждения при перемещении точки короткого замыкания от подстанции *А* к *В* (кривая 3) и построены характеристики 1, 2 защит *A1* и *A2* соответственно. Из графиков видно основное преимущество защиты с зависимой характеристикой — отключение близких повреждений с малой выдержкой времени при обеспечении селективности в случаях короткого замыкания на соседней линии. Достоинством рассматриваемой защиты является также отсутствие отдельных реле времени (что упрощает схему) и удобное согласование с пусковой характеристикой электродвигателей. Наряду с этим она имеет существенные недостатки, которых нет у максимальной защиты с независимой характеристикой выдержки времени: большие выдержки времени в минимальных (точнее, не в максимальных) режимах работы и при действии защиты в качестве резервной; зависимость уставки времени срабатывания от максимального тока к. з., что требует изменять уставки с развитием системы электроснабжения и держать их все время под наблюдением.

Выбор тока срабатывания. При выборе тока срабатывания защиты $I_{с.з.}^{III}$ необходимо исходить из условий возврата измеритель-

ного органа в начальное положение после его срабатывания при отключении внешнего короткого замыкания. Действительно, при коротком замыкании в точке K_2 (см. рис. 5.9) срабатывают измерительные органы защиты A_2 , расположенной ближе к месту повреждения, и защиты A_1 . При этом на отключение действует только защита A_2 , так как она имеет меньшую выдержку времени. Однако такое действие защиты имеется только в том случае, если после срабатывания защиты A_2 и отключения короткого замыкания измерительный орган защиты A_1 возвращается в начальное состояние. Для этого необходимо, чтобы ток возврата защиты был больше максимально возможного тока в линии $I_{з\max}$ после отключения внешнего короткого замыкания (рис. 5.12), т. е.

$$I_{в.з}^{III} > I_{з\max}$$



Рис. 5.12. График изменения тока в линии при нормальном режиме, при коротком замыкании и после его отключения

При определении тока $I_{з\max}$ необходимо учитывать возможность увеличения тока в защищаемой линии вследствие самозапуска электродвигателей при восстановлении напряжения после отключения короткого замыкания, а также длительные допустимые перегрузки при АВР, при отключении одной из параллельных линий и т. п. [55]. Ток $I_{з\max}$ обычно больше длительно существующего максимального рабочего тока $I_{раб\max}$, что учитывается коэффициентом самозапуска $k_{сзп} \approx 2,5 \dots 3$. В связи с этим селективное действие защиты обеспечивается, если $I_{в.з}^{III} > k_{сзп} I_{раб\max}$ или с учетом коэффициента отстройки $k_{отс}^{III}$

$$I_{в.з}^{III} = k_{отс}^{III} k_{сзп} I_{раб\max} \quad (5.6)$$

Коэффициент отстройки учитывает, например, погрешности реле, неточности расчета и принимается равным $k_{отс}^{III} = 1,1 \dots 1,2$.

Согласно (2.5), с учетом коэффициента возврата $k_{в} = I_{в.з}^{III} / I_{с.з}^{III}$ из (5.6) получается следующее выражение для тока срабатывания защиты:

$$I_{с.з}^{III} = k_{отс}^{III} k_{сзп} I_{раб\max} / k_{в} \quad (5.7)$$

Таким образом, для вторичных реле общее расчетное выражение для определения тока срабатывания реле имеет вид

$$I_{с.р}^{III} = (k_{отс}^{III} k_{сзп} / k_{в}) k_{сх}^{(3)} (I_{раб\max} / K_I) \quad (5.8)$$

При определении максимального рабочего тока $I_{раб\max}$ расчетным может быть случай отключения защищаемой линии при к.з. и ее успешного повторного включения устройством АПВ [10]. При отключении линии измерительные органы защиты возвращаются в

исходное состояние, поэтому коэффициент возврата в выражениях (5.7) и (5.8) в этом случае принимается $k_n = 1$.

Для обеспечения селективности в ряде случаев, например при использовании реле РТВ, требуется, чтобы по мере приближения к источнику питания ток срабатывания защит увеличивался. В других случаях ток срабатывания $I_{с.з1}^{III}$ защиты А1, расположенной вблизи источника питания, должен быть не меньше тока срабатывания $I_{с.з2}^{III}$ защиты А2 (см. рис. 5.9). Таким образом, должно выполняться условие $I_{с.з(n-1)}^{III} \geq I_{с.зn}^{III}$.

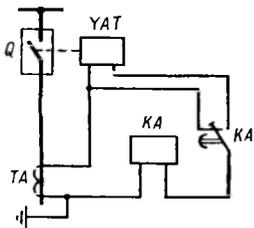


Рис. 5.13. Принципиальная однолинейная схема максимальной токовой защиты с непосредственным питанием оперативных цепей переменного тока от вторичной обмотки трансформатора тока

В ряде случаев приходится учитывать также влияние токов нагрузки [55]. При этом, в частности, должно выполняться условие $I_{с.з(n-1)}^{III} \geq (I_{с.зn}^{III} + I_{\text{раб max}})$, где $I_{\text{раб max}}$ — максимальный рабочий ток электропотребителей подстанции Г (см. рис. 5.9). Чувствительность максимальной токовой защиты проверяют по минимальному току $I_{\text{к min}}$ при повреждении в конце защищаемой линии (см. рис. 5.9, точка K_3). Чувствительность считается достаточной при $k_{\text{ч}}^{III} \geq 1,5$ [3]. Если максимальная токовая защита осуществляет дальнейшее резервирование, ее коэффициент чувствительности определяется по минимальному току к. з. в конце смежного участка (см. рис. 5.9, точка K_1 для защиты А1). При этом необходимо,

чтобы $k_{\text{ч}}^{III} \geq 1,2$ [3]. При наличии нескольких линий, отходящих от шин приемной подстанции, коэффициент $k_{\text{ч}}^{III} \geq 1,2$ должен обеспечиваться при коротком замыкании в конце любой из них. В системах электроснабжения для выполнения максимальной токовой защиты часто используют индукционное реле РТ-80 (см. § 2.6). В этом случае источником оперативного тока являются трансформаторы тока, а защита выполняется по схеме с дешунтированием электромагнита отключения выключателя при срабатывании (рис. 5.13). В такой схеме трансформатор тока используется не только как измерительный, но и для питания электромагнита отключения выключателя. Схема выполняется так, что электромагнит отключения YAT подключается к трансформатору тока ТА только при срабатывании защиты. При этом для предотвращения недопустимого размыкания цепи трансформатора тока используется реле КА с переключающим без размыкания цепи контактом, например реле РТ-85. В процессе переключения сначала электромагнит отключения YAT выключателя Q подключается к трансформатору тока (замыкается правый контакт КА), а затем он дешунтируется (размыкается левый контакт). Выключатель Q отключается, если ток в электромагните отключения окажется достаточным для его действия.

Таким образом, в такой схеме трансформаторы тока работают в двух режимах:

до срабатывания реле — в режиме источника тока; нагрузкой трансформатора тока является сопротивление обмотки реле и сопротивление проводов, поэтому при срабатывании защиты от трансформаторов тока потребляется только мощность, необходимая для действия реле; при этом полная погрешность трансформатора тока не должна превышать $\varepsilon \leq 10\%$ (см. § 1.1);

после срабатывания реле — в режиме, близком к режиму отдачи максимальной мощности; в результате дещунтирования электромагнита отключения выключателя нагрузка трансформатора тока резко возрастает; его вторичный ток уменьшается; трансформатор тока должен обеспечить отдачу мощности, необходимой для действия электромагнита отключения выключателя; при этом уменьшившийся ток в реле должен обеспечить его удержание в состоянии после срабатывания, т. е. должен быть больше тока возврата реле. К контактной системе реле предъявляются требования надежно дещунтировать электромагнит отключения при возможных токах к. з.

Таким образом, при расчете параметров (тока срабатывания и выдержки времени) максимальной токовой защиты с дещунтированием электромагнита отключения выключателя необходимо дополнительно проверить: надежность действия электромагнитов отключения выключателя после их дещунтирования; отсутствие возврата реле после дещунтирования электромагнитов отключения; коммутационную способность переключающих контактов реле.

Надежное действие электромагнита отключения обеспечивается, если ток срабатывания защиты $I_{с.з}^{III}$ превышает некоторое значение первичного тока $I_{1э.о.}$, при котором в электромагните отключения проходит ток, достаточный для его действия, т. е. если

$$I_{с.з}^{III} \geq I_{1э.о.} \quad (5.9)$$

Условие (5.9) проверяют в следующем порядке. При заданном токе действия (срабатывания) электромагнита отключения $I_{с.з.о.}$ определяют вторичный ток, необходимый для его надежного действия: $I_2 = k_{отс} I_{с.з.о.}$, где коэффициент отстройки $k_{отс} = 1,2 \dots 1,4$. С учетом погрешности трансформаторов тока $I_{1э.о.} = |I_2 + I'_{нам}| K_I$. Ток намагничивания $I'_{нам}$, в частности, можно определить по типовой характеристике намагничивания $B = f(H)$ при заданных сечении сердечника S , числе витков вторичной обмотки ω_2 и средней длине пути магнитного потока $l_{ср.}$. Сначала определяют вторичную ЭДС трансформатора тока при подключенном к нему электромагните отключения $E_2 = I_2 (Z_2 + Z_{II})$, затем определяют максимальную индукцию $B_{max} = E_2 \cdot 10^8 / (4,44 f \omega_2 S)$ и по кривой намагничивания находят напряженность магнитного поля H . Соответствующий ей ток намагничивания $I'_{нам} = H l_{ср.} / \omega_2$. Если при найденном токе намагни-

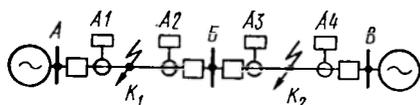


Рис. 5.14. Размещение токовых защит в сети с двусторонним питанием

чивания ток $I_{13.0}$ такой, что условие (5.9) не удовлетворяется, то возникает необходимость в последовательном соединении трансформаторов тока.

Для исключения возврата измерительных реле защиты после дешунтирования электромагнита

отключения необходимо, чтобы выполнялось условие

$$I_2 \geq k_{отс} I_{н.р.}, \quad (5.10)$$

где $k_{отс} = 1,2$.

Возможность применения схемы с дешунтированием по условию работы контактов реле проверяют по формуле

$$I_{к \max}^{(3)} / K_1 \leq 150 \text{ А}. \quad (5.11)$$

В распределительных сетях с двусторонним питанием, а также в сложных сетях с одним и несколькими источниками питания селективность действия максимальной токовой защиты не обеспечивается, что подтверждает пример выполнения защиты в радиальной сети с двусторонним питанием (рис. 5.14). При коротком замыкании в любой точке сети, в том числе и в точке K_1 , в общем случае приходят в действие все защиты. При этом для селективного отключения поврежденного участка AB необходимо, чтобы выдержка времени t_2^{III} защиты $A2$ была меньше выдержек времени t_3^{III} защиты $A3$ и t_4^{III} защиты $A4$, т. е. $t_2^{III} < t_3^{III}$ и $t_2^{III} < t_4^{III}$. Наряду с этим для селективного действия защиты при коротком замыкании в точке K_2 должно выполняться условие $t_3^{III} < t_2^{III}$ и $t_3^{III} < t_1^{III}$. Из этого следует, что к защитам $A2$ и $A3$ предъявляются противоречивые требования. Невозможно выполнить условие, при котором в одно и то же время выдержка времени защиты $A2$ была бы и больше и меньше выдержки времени защиты $A3$, поэтому в таких сетях максимальная токовая защита не может быть селективной и применение ее невозможно.

§ 5.6. СОВМЕСТНОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ И УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ И АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА

Для изучения рассматриваемых здесь вопросов не требуется знание самих устройств автоматики, принципа их действия и выбора параметров. Достаточно общих сведений, данных в § В.2 и В.5. Наша цель показать, как путем согласования действия токовой защиты с действием, например устройств автоматического повторного включения (УАПВ), можно расширить защищаемую зону

первой ступени защиты — токовой отсечки, распространив ее на всю длину линии. При этом, безусловно, повышается и эффективность самого УАПВ.

На рис. 5.15, а показана радиальная сеть с односторонним питанием, защищенная максимальными токовыми защитами $A1$ — $A3$.

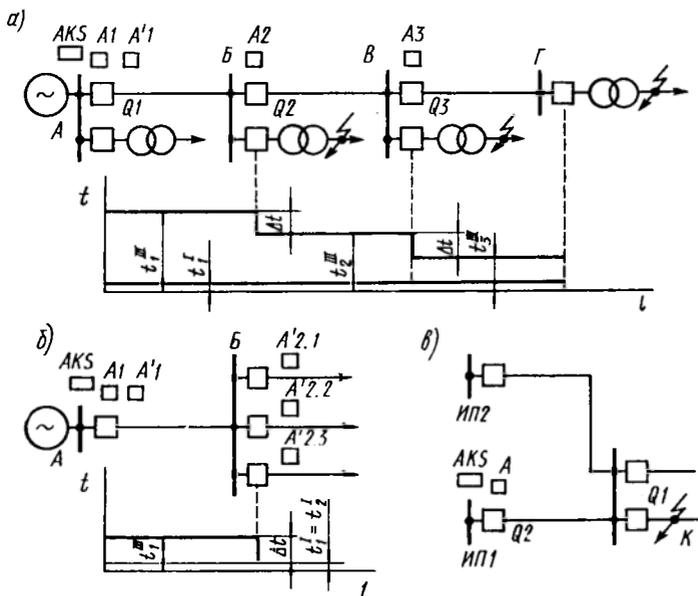


Рис. 5.15. Размещение токовых защит, действующих в сочетании с УАПВ

Линия AB оборудована устройством автоматического повторного включения AKS . Выдержки времени защит выбраны по ступенчатому принципу. При этом наиболее тяжелые короткие замыкания на линии AB отключаются с наибольшей выдержкой времени t_1^{III} , что в ряде случаев недопустимо. Для ускорения отключения повреждений на линии AB установлена токовая отсечка $A'1$ без выдержки времени, однако она защищает только часть линии. Короткие замыкания в конце линии и при наличии токовой отсечки отключает максимальная токовая защита.

Наличие устройства AKS позволяет расширить защищаемую зону токовой отсечки и отстроить ее ток срабатывания только от коротких замыканий за трансформаторами подстанций B — $Г$, которые также снабжены быстродействующими защитами. При этом токовая отсечка $A'1$ может срабатывать не только при коротких замыканиях на линии AB , но и при повреждении на других линиях, шинах и сторонах высшего напряжения трансформаторов, т. е. мо-

жет работать неселективно и каждый раз отключать выключателем QI всю радиальную сеть с минимальным временем t_1^I . Затем действует AKS и включает выключатель QI . Линия остается в работе, если короткое замыкание самоустраняется или поврежденным оказывается трансформатор, который отключается одновременно с линией AB своей собственной быстродействующей защитой. В случае неустранившегося короткого замыкания отсечка могла бы подействовать вторично; для исключения этого она после первого же срабатывания перед действием AKS автоматически выводится из работы, а устойчивые короткие замыкания отключаются соответствующими максимальными токовыми защитами.

Сочетание неселективно действующей токовой отсечки без выдержки времени, работающей только по АПВ, с максимальной токовой защитой называется *токовой защитой с ускорением до АПВ*. Недостатком защиты является возможность развития аварий в случае отказа устройства АПВ или выключателя. Кроме того, выключатель должен чаще обычного ремонтироваться, так как он отключается при повреждении любой линии и трансформатора. Тем не менее защита с ускорением до АПВ находит широкое применение благодаря простоте и возможности существенно расширить защищаемую зону токовых отсечек, снижая в большинстве случаев повреждений время отключения.

При наличии УАПВ можно выполнять защиту с другим порядком действия отсечки и максимальной токовой защиты. Отсечка выводится из действия, а поврежденная линия отключается селективно максимальной токовой защитой и включается повторно устройством АПВ. При этом вводится в действие токовая отсечка и отключает линию, если повреждения не устраняются. Такое сочетание максимальной токовой защиты и токовой отсечки называется *токовой защитой с ускорением после АПВ*. Аналогично согласуется действие токовой защиты с действием устройств автоматического включения резерва (УАВР). Если к резервному источнику питания устройством АВР подключается поврежденный элемент системы электроснабжения, то токовая защита с ускорением после АВР его отключает.

Более просто можно выполнить защиту, если на вторых участках сети устанавливать не максимальные токовые защиты, а токовые отсечки $A'2.1$ — $A'2.3$ (рис. 5.15, б). При коротких замыканиях на одном из этих участков срабатывает не только отсечка $A'1$, установленная на линии AB , но и отсечка $A'2$ поврежденного участка. В связи с этим отпадает необходимость выводить из действия отсечку $A'1$; тем самым неустранившиеся короткие замыкания на линии AB отключаются с минимальным временем t_1^I . Токовая отсечка на линии AB в данном случае становится основной защитой.

Известны [56] и другие способы согласования действия защиты и устройств АПВ, например *токовая защита с поочередным АПВ*.

Неселективная отсечка в сочетании с УАПВ используется так-

же для снижения мощности короткого замыкания [57]. Это становится необходимым, когда вследствие развития системы электропитания увеличивается мощность короткого замыкания и выключатели в некоторых цепях не смогут отключить возросшие токи к.з. В таких случаях при возникновении повреждения (рис. 5.15, в, точка К) можно отключить один из источников питания, например ИП1, и тем самым уменьшить ток к.з. После отключения поврежденной линии выключателем Q1 источник следует включить вновь. Отключение и повторное включение источника питания осуществляются совместным действием неселективной токовой отсечки А и устройства АКС. Устройства АПВ применяются для совместной работы и с другими защитами и устройствами автоматики.

§ 5.7. СХЕМЫ И ОБЩАЯ ОЦЕНКА ТОКОВЫХ ЗАЩИТ

Для осуществления измерительной части токовой защиты можно использовать одну из рассмотренных схем (см. § 5.2) соединения измерительных преобразователей тока и цепей тока вторичных измерительных органов. Выбор схемы определяется назначением защиты и предъявляемыми к ней требованиями. Измерительная часть у всех ступеней одинакова, поэтому если защита содержит несколько ступеней, то их измерительные органы соединяются между собой последовательно. При наличии отдельного органа выдержки времени логическая часть второй ступени и логическая часть третьей ступени защиты тоже одинаковы. В этом случае одна и та же схема защиты может быть использована как для выполнения токовой отсечки с выдержкой времени, так и для выполнения максимальной токовой защиты. Нет различия и между схемами максимальной токовой защиты и токовой отсечки без выдержки времени, выполненных на основе вторичных реле прямого действия типа РТВ и РТМ. В системах электропитания часто используют комбинированное реле РТ-80 или аналогичные полупроводниковые реле. Они позволяют выполнить токовую защиту двухступенчатой, содержащей первую и третью ступени. Для изображения устройств защиты и автоматики используются принципиальные (полные), структурные, функциональные и монтажные схемы.

Принципиальные (полные) схемы изображают в совмещенном и разнесенном видах. На рис. 5.16, а показана принципиальная совмещенная схема, одинаковая и для второй и для третьей ступеней защиты на постоянном оперативном токе. На схеме контакты и выводы обмоток реле даны в совмещенном виде так, что видна их взаимная принадлежность. Обычно наряду со схемой релейной защиты изображают схему первичных соединений защищаемого присоединения. По мере усложнения схем релейной защиты появляется большое количество реле, контактов и пересекающихся цепей, поэтому принципиальные совмещенные схемы теряют наглядность и становятся сложными. Схему можно упростить путем раз-

дельного построения цепей переменного тока, напряжения, цепей управления и др. Такой способ изображения схем называется *разнесенным*.

На рис. 5.16, б, в изображена та же токовая защита разнесенным способом. В этой схеме реле как единого условного обозначения не существует. В частности, контакты и обмотки реле тока размеща-

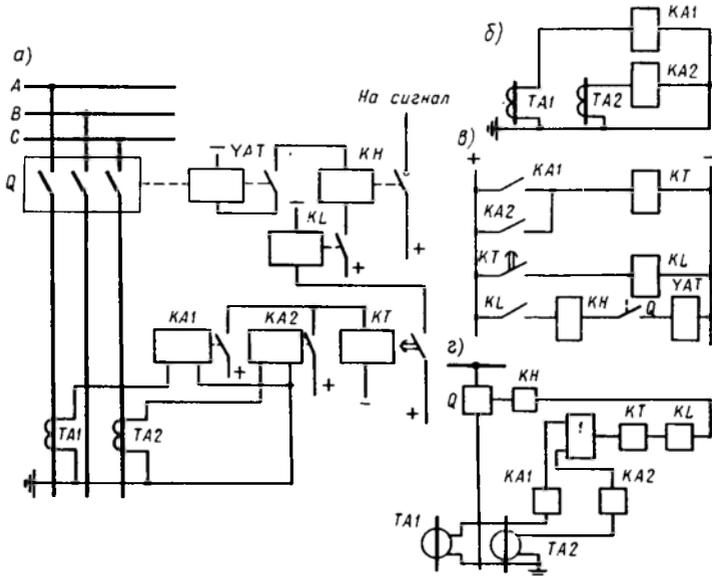


Рис. 5.16. Совмещенная (а), разнесенные (б, в) и функциональная (г) схемы максимальной токовой защиты на постоянном оперативном токе

ются в разных местах (контакты — в цепях управления, обмотки — в цепях тока). Их взаимная принадлежность определяется соответствующими буквенными и цифровыми обозначениями.

В структурных схемах устройства защиты и автоматики разбираются на отдельные части, которые изображают в виде прямоугольников с соответствующими обозначениями. Схема, не выявляя существа работ этих частей, показывает лишь структуру устройства и взаимосвязь между отдельными частями.

Функциональные схемы являются развитием структурных схем. Они более детализированы. Это позволяет отразить взаимосвязь и существо процессов, протекающих в отдельных частях устройства. Функциональная схема рассматриваемой защиты показана на рис. 5.16, г.

Государственным стандартом (ГОСТ 2.755—74) введены единые условные обозначения электрических аппаратов и их элементов, в

соответствии с которыми аппараты обозначаются в положении, принятом за начальное, т. е. в отключенном (невозбужденном) состоянии. Позиционные буквенно-цифровые обозначения в схемах установлены ГОСТ 2.710—81. В системах электроснабжения, как отмечалось выше (см. § 5.2), токовые защиты от междуфазных к. з. обычно выполняют по двухфазным двухрелейным схемам. Рассмотрим некоторые из них.

Схема токовой защиты с независимой выдержкой времени на постоянном оперативном токе. Защита выполняется по схеме неполной звезды на постоянном оперативном токе (рис. 5.16) с использованием двух трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$, установленных в фазах A и C за выключателем Q . Защита может подключаться и к трансформаторам тока, расположенным до выключателя (они обычно встроены во втулки выключателей). Исходя из требований техники безопасности вторичные обмотки трансформаторов тока заземляются. Измерительный орган защиты выполнен из двух максимальных реле тока $KA1$, $KA2$ типа РТ-40, а орган выдержки времени представляет собой реле времени KT типа ЭВ-134. В схему защиты включены промежуточное реле KL типа РП-23 и указательное реле KII типа РУ-1. Необходимость промежуточного реле обуславливается недостаточной коммутационной способностью контактов реле времени. При возникновении повреждения срабатывают реле тока $KA1$ и $KA2$ (или одно из них) и контактами $KA1$ и $KA2$ (или одним из них) замыкают цепь обмотки реле времени KT , приводя его в действие. По истечении установленной выдержки времени реле замыкает контакт KT в цепи обмотки промежуточного реле KL , которое, срабатывая, замыкает контакт KL и отключает выключатель. При этом указательное реле KII фиксирует действие защиты на отключение. Контакт промежуточного реле KL не рассчитан на отключение тока, потребляемого электромагнитом отключения YAT . Поэтому в цепь электромагнита отключения последовательно с контактом реле KL включен вспомогательный контакт выключателя Q , который размыкает цепь YAT при отключении выключателя. Рассмотренную схему можно использовать для выполнения максимальной токовой защиты и для выполнения токовой отсечки с выдержкой времени (II и III ступени защиты).

Схема токовой защиты с вторичными реле тока прямого действия РТВ и РТМ. С помощью реле РТВ выполняют максимальную токовую защиту, а с помощью реле РТМ — токовую отсечку без выдержки времени. Эти реле встраивают в грузовые и пружинные приводы, предназначенные для выключателей присоединений напряжением 6—35 кВ. Во многих современных пружинных и грузовых приводах имеются два реле РТВ или два реле РТМ. При этом максимальная токовая защита или токовая отсечка выполняются по схеме, показанной на рис. 5.17, а.

Схема токовой защиты с комбинированной характеристикой выдержки времени (двухступенчатая токовая защита, содержащая I и III ступени). Защита выполняется с помощью индукционного реле РТ-85 на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнитов отключения выключателя. Схема защиты выполнена с двумя реле $KA1$ и $KA2$ и двумя электромагнитами отключения $YAT1$ и $YAT2$ (рис. 5.17, б). В нормальном режиме цепи электромагнитов отключения разомкнуты на контактах соответствующих реле. При срабатывании реле в процессе переключения контакта сначала включается электромагнит отключения в цепь трансформатора тока, а затем он дешунтируется и, срабатывая, отключает выключатель.

Рассмотренная схема защиты проста, она широко применяется на выключателях с грузовыми и пружинными приводами, электромагниты отключения которых потребляют относительно небольшую мощность. В качестве электромагнитов отключения можно использовать реле РТМ.

Схема токовой защиты с независимой выдержкой времени на переменном оперативном токе. Защита выполняется по схеме неполной звезды с дешунти-

рованием электромагнитов отключения, с промежуточными реле РП-341 и реле времени РВМ-12. В схеме защиты (рис. 5.18) измерительный орган состоит из двух реле тока $KA1$, $KA2$ типа РТ-40.

Первичные обмотки $TL1.1$, $TL2.1$ насыщающихся трансформаторов реле времени KT включены на фазные токи трансформаторов тока $TA1$ и $TA2$ последовательно с обмотками реле тока и первичными обмотками $TL3.1$, $TL4.1$ насыщающихся трансформаторов промежуточных реле $KL1$, $KL2$ (рис. 5.18, а). Реле времени срабатывает только при замыкании его цепи управления контак-

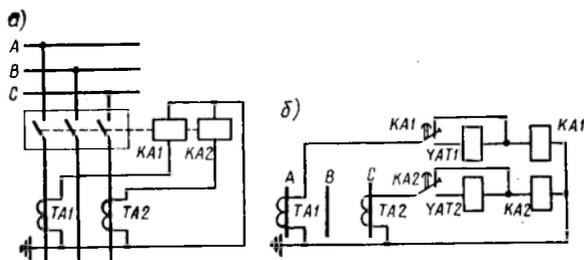


Рис. 5.17. Максимальная токовая защита с реле прямого действия типа РТВ (а) и с реле косвенного действия на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнита отключения (б)

тами $KA1.1$ или $KA2.1$ реле тока. Схема включения реле времени выполнена так, что при любых коротких замыканиях пуск его всегда осуществляется каким-либо одним реле (рис. 5.18, б). Как указывалось выше (см. § 2.4), это необходимо для правильного действия реле времени. По истечении заданной выдержки времени реле срабатывает и его контакт KT замыкает цепь управления промежуточных реле $KL1$, $KL2$ (рис. 5.18, в).

Реле $KL1$ и $KL2$ (или одно из них) срабатывают и своими переключающими контактами $KL1.1$, $KL2.1$ сначала включают в цепь трансформаторов тока, а затем дешунтируют электромагниты отключения $YAT1$ и $YAT2$. При этом вследствие увеличения нагрузки трансформаторов тока их вторичные токи могут снизиться настолько, что реле тока, а следовательно, и реле времени вернуться в исходное состояние прежде, чем произойдет отключение выключателя. Отключить поврежденный участок защита не сможет. Для предотвращения этого в схеме защиты предусмотрено шунтирование контакта реле времени KT замыкающими контактами $KL1.2$, $KL2.2$ промежуточных реле, после срабатывания которых действие защиты уже не зависит от поведения измерительного органа.

В схеме защиты предусмотрено указательное реле KH типа РУ-1, обмотка которого включена в цепь управления промежуточных реле. Все реле возвращаются в исходное состояние после действия электромагнитов отключения и отключения выключателя.

Рассмотренная схема пригодна для выполнения и максимальной токовой защиты, и токовой отсечки с выдержкой времени.

Схема токовой защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени на переменном оперативном токе. На рис. 5.19 показана схема двухступенчатой токовой защиты от многофазных к.з. на переменном оперативном токе. В измерительных органах защиты использованы реле тока $KA1$ — $KA4$ типа РТ-40. Первая ступень защиты (реле $KA1$, $KA2$, $KH1$) является токовой отсечкой без выдержки времени, а вторая ($KA3$, $KA4$, KT , $KH2$) — токовой отсечкой с выдержкой времени или максимальной токовой защитой (рис. 5.19, а). Выдержка времени создается реле времени РВМ-12 (реле KT), а его цепь управления (рис. 5.19, б) выполнена, как и в схеме токовой защиты (рис. 5.18, б). Элек-

электромагниты отключения $YAT1$, $YAT2$ включаются в цепь трансформаторов тока и дешунтируются переключающими контактами выходных промежуточных реле $KL1$, $KL2$ типа РП-341. Указательное реле $KH1$ срабатывает при замыкании контактов реле тока $KA1$, $KA2$ первой ступени, а указательное реле $KH2$ — при срабатывании реле времени KT (рис. 5.19, а).

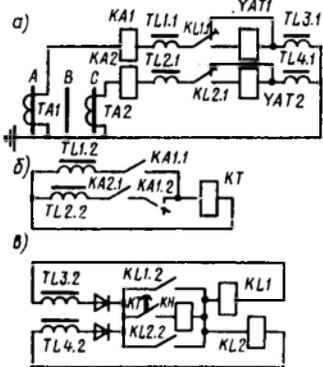


Рис. 5.18. Максимальная токовая защита с независимой выдержкой времени на переменном оперативном токе:

а — цепи тока; б — цепи реле времени; в — цепи промежуточных реле

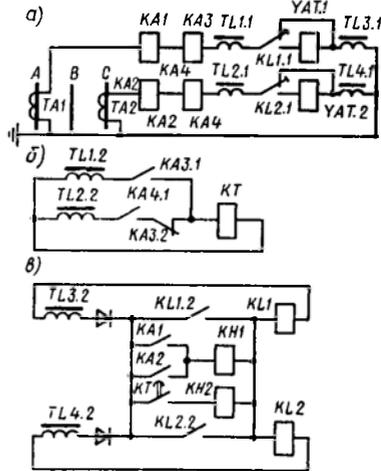


Рис. 5.19. Двухступенчатая токовая защита от многофазных коротких замыканий на переменном оперативном токе

Схема токовой защиты на переменном оперативном токе с использованием блоков питания и заряда. На рис. 5.20, а, б приведены схемы защиты с комбинированной характеристикой выдержки времени. В схеме использовано реле РТ-85. В отличие от рассмотренных выше схем здесь выключатель отключается за счет энергии, запасенной в конденсаторе C , который заряжается с помощью блока питания и заряда UGV типа БПЗ-401, подключенного к трансформатору напряжения TV . Отказ от вспомогательного контакта в цепи электромагнита отключения выключателя возможен в связи с кратковременностью прохождения тока разряда конденсатора в электромагните отключения при срабатывании защиты. Блок питания и заряда используют не только для отключения выключателя, но и для питания оперативных цепей защиты в целом. При этом защита выполняется по схеме, показанной на рис. 5.16, но оперативным током является выпрямленный ток. Схемы включения блоков питания и заряда рассмотрены в § 1.8. В защитах на основе полупроводниковой элементной базы используют те же схемы соединения измерительных преобразователей тока и измерительных органов, что и в рассмотренных защитах с электромеханическими реле, но для питания оперативных цепей применяют иные блоки питания. Защита в целом получается достаточно

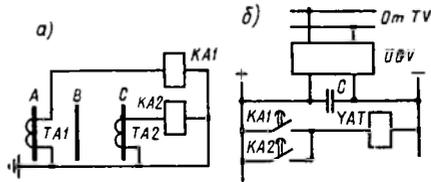


Рис. 5.20. Максимальная токовая защита с ограниченно зависимой выдержкой времени на выпрямленном оперативном токе

сложной, поэтому для ее изображения широко используют структурные и функциональные схемы (см. рис. 5.16, г).

Общая оценка токовых защит. Токовые отсечки без выдержки и с выдержкой времени и максимальная токовая защита образуют первую, вторую и третью ступени трехступенчатой токовой защиты. Вместе с тем каждая из них может использоваться и как отдельная защита. Основными достоинствами токовых отсечек без выдержки времени являются: селективное действие и в сетях сложной конфигурации с любым числом источников питания; быстрое отключение наиболее тяжелых коротких замыканий, возникающих вблизи шин станций и подстанций; простота схемы. Основные ее недостатки: защита только части длины линии; зависимость защищаемой зоны от режима работы системы и переходного сопротивления в месте короткого замыкания. В связи с указанным токовые отсечки без выдержки времени как отдельные защиты применяются в виде дополнительных защит, предназначенных для сокращения времени отключения наиболее тяжелых повреждений. При этом защищаемая зона должна быть не менее $l = (0,15 \dots 0,2) l_{\text{л}}$ длины линии.

Токовая отсечка с выдержкой времени имеет сравнительно небольшое время срабатывания, способна осуществлять дальнейшее и ближнее резервирование, селективна в сетях с двусторонним питанием. Однако в ряде случаев чувствительность ее оказывается недостаточной. Максимальная токовая защита обеспечивает отключение повреждения только в радиальных сетях с односторонним питанием. При этом в связи с выбором выдержек времени по ступенчатому принципу могут быть недопустимо большие времена отключения повреждений вблизи источников питания. Требуемая чувствительность защиты обеспечивается не всегда, особенно при дальнем резервировании. Вместе с тем максимальная токовая защита сравнительно проста и достаточно надежна. Несмотря на отмеченные недостатки, она широко применяется в радиальных сетях всех напряжений с одним источником питания; в системах электроснабжения напряжением 10 кВ и ниже она является основной защитой. Максимальная токовая защита обычно объединяется с токовыми отсечками, образуя вместе с ними защиту со ступенчатой характеристикой выдержки времени. Такая защита дает возможность, особенно при наличии УАПВ, сравнительно быстро отключать повреждения в любой точке сети и во многих случаях отказаться от более сложных защит. Однако следует иметь в виду, что в целом токовые защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени обеспечивают селективное действие только в сетях с односторонним питанием. При этом чувствительность в ряде случаев оказывается недостаточной. Это характерно прежде всего для сетей сельскохозяйственного электроснабжения. Уменьшить ток срабатывания защиты и тем самым повысить ее чувствительность

можно либо применением комбинированного измерительного органа (реле тока и реле напряжения), либо введением в схему различных блокировок, предотвращающих излишние срабатывания защиты.

§ 5.8. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМИ ОРГАНАМИ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительная часть защиты содержит реле тока и реле напряжения. На линиях электропередачи такой комбинированный измерительный орган используют для повышения чувствительности токовых отсеков (первой и второй ступеней защиты). Третья ступень — максимальная токовая защита с комбинированным измерительным органом — применяется в качестве защиты генераторов и трансформаторов от внешних к. з. Выбор параметров защиты рассмотрим на примере токовой отсечки без выдержки времени. На рис. 5.21 показана линия с односторонним питанием, работающая в блоке с трансформатором T . По мере приближения точки трехфазного короткого замыкания к шинам подстанции A остаточное напряжение $U^{(3)}_{ост}$ на шинах уменьшается согласно кривой 1 (имеется в виду действующее значение периодической составляющей напряжения для момента времени $t=0$). При других многофазных коротких замыканиях аналогично изменяется остаточное напряжение между поврежденными фазами.

Обычно в схеме токовой отсечки используют три минимальных реле напряжения, включенных на соответствующие междуфазные напряжения. Параметрами отсечки без выдержки времени с блокировкой по напряжению являются ток срабатывания $I^I_{с.з}$ и напряжение срабатывания $U^I_{с.з}$. Путем особого согласования их между собой удастся расширить зону действия защиты, обеспечивая селективность при внешних коротких замыканиях и любых режимах работы питающей системы.

Ток срабатывания защиты $I^I_{с.з}$ определяют, исходя из требования достаточной чувствительности защиты по току при металлическом двухфазном коротком замыкании в конце защищаемой линии (точка K_2);

$$I^I_{с.з} = I^{(2)}_{к\ min} / k^I_4 \quad (5.12)$$

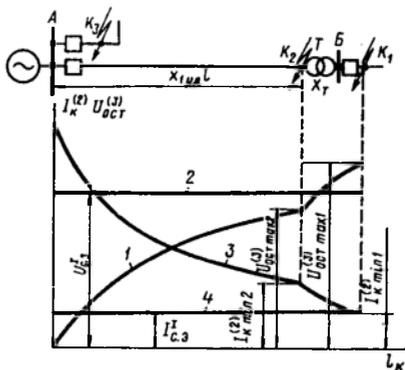


Рис. 5.21. Выбор тока и напряжения срабатывания токовой отсечки с блокировкой по напряжению

где $k_{\text{чI}}^I$ — требуемый коэффициент чувствительности по току.

На рис. 5.21 ток $I_{\text{K}}^{(2)}$ при перемещении точки повреждения изменяется согласно кривой 3, а ток $I_{\text{с.з}}^I$ определяется прямой 4. Для предотвращения неправильного действия защиты при нарушении цепей напряжения ток $I_{\text{с.з}}^I$ должен быть отстроен от максимального рабочего тока по условию

$$I_{\text{с.з}}^I = k_{\text{отс}}^I I_{\text{раб макс}} / k_{\text{в}} \quad (5.13)$$

Окончательно ток срабатывания $I_{\text{с.з}}^I$ выбирают по большему из двух значений, полученных по условиям (5.12) и (5.13). Обычно расчетным является выражение (5.12), при этом не исключена возможность срабатывания реле тока защиты при коротких замыканиях за трансформатором, т. е. вне защищаемой зоны.

Для исключения неселективной работы защиты в целом при внешних коротких замыканиях напряжение срабатывания защиты $U_{\text{с.з}}^I$ выбирают меньшим остаточного напряжения $U_{\text{ост}}^{(3)}$ в месте включения защиты (на шинах А) при трехфазном коротком замыкании за трансформатором (точка К₁). Предполагают, что при этом по защищаемой линии проходит ток $I_{\text{K1}} = I_{\text{с.з}}^I$, т. е.

$$U_{\text{с.з}}^I < U_{\text{ост}}^{(3)} = \sqrt{3} I_{\text{с.з}}^I (X_{1\text{уд}} l + X_{\text{T}})$$

или с учетом коэффициента отстройки $k_{\text{отс}}^I = 1,2$

$$U_{\text{с.з}}^I = \sqrt{3} I_{\text{с.з}}^I (X_{1\text{уд}} l + X_{\text{T}}) / k_{\text{отс}}^I \quad (5.14)$$

Такой выбор напряжения срабатывания исключает возможность срабатывания защиты при любых токах повреждения, проходящих по линии при внешних коротких замыканиях. Действительно, при токе $I_{\text{K1}} < I_{\text{с.з}}^I$ селективность защиты достигается недействием реле тока, а при $I_{\text{K1}} > I_{\text{с.з}}^I$ — недействием реле напряжения, так как при этом $U_{\text{ост 1}} > U_{\text{с.з}}^I$.

Реле напряжения не должны срабатывать в нормальном режиме, поэтому вторым условием выбора $U_{\text{с.з}}^I$ является отстройка от минимального рабочего напряжения по условию

$$U_{\text{с.з}}^I = U_{\text{раб мин}} / k_{\text{отс}}^I \approx 0,7 U_{\text{ном}} \quad (5.15)$$

При коротком замыкании в конце защищаемой линии (точка К₂) защита должна обладать достаточной чувствительностью по напряжению. Допускается минимальный коэффициент чувствительности $k_{\text{чV}}^I = U_{\text{с.з}}^I / U_{\text{ост макс}} = 1,4 \dots 1,5$.

Следует иметь в виду, что если по условию чувствительности значение $U_{\text{с.з}}^I$ необходимо принять большим расчетного, то нужно уве-

лчить и ток $I_{с.з}$, чтобы сохранялось условие (5.14). В противном случае селективность защиты при внешних коротких замыканиях нарушается. Для второй ступени защиты расчет параметров производится аналогично.

§ 5.9. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ, ЗАВИСИМОЙ ОТ ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ТОКА

Недостатки токовой защиты особенно проявляются в сельских распределительных сетях напряжением 6—20 кВ, для которых характерны применение на линиях сталеалюминовых и стальных проводов малых сечений, значительная протяженность воздушных линий, рассредоточенное по длине линии подключение трансформаторов 6—20/0,4 кВ (рис. 5.22, а). В таких сетях повреждения в конце защищаемой линии (точка K_1) и короткие замыкания за трансформатором (например, в точке K_2) сопровождаются прохождением в начале защищаемой линии соизмеримых токов. Поэтому добиться выполнения требований селективности и чувствительности токовой защиты при удовлетворительной скорости действия весьма трудно.

Для токовой защиты, обладающей достаточной чувствительностью при коротком замыкании в зоне и не требующей согласования с защитами сетевых трансформаторов при повреждении на стороне 0,4 кВ, должны одновременно выполняться известные условия

$$I_{с.з} < (V\sqrt{3}/2) I_{к(10)}^{(3)}/k_q; \quad I_{с.з} > k_{отс} I_{к(0,4)}^{(3)},$$

где $I_{к(10)}^{(3)}$, $I_{к(0,4)}^{(3)}$ — токи в защите A при повреждении в точке K_1 и соответственно в точке K_2 .

При $k_q = 1,5$ и $k_{отс} = 1,2$ отношение $I_{к(10)}^{(3)}/I_{к(0,4)}^{(3)} > 2,0$. В сельских сетях, например Ульяновской энергетической системы, полученное условие выполняется только для $1/3$ всех линий напряжением 10 кВ. Для остальных линий селективное действие защиты при повреждении за трансформаторами можно обеспечить лишь путем выдержки времени, что приводит к увеличению объема разрушений в месте повреждения, снижению доли успешных АПВ и возрастанию ущерба от недоотпуска электроэнергии.

В связи с этим предложен способ выполнения токовой защиты, основанный на использовании в качестве дополнительного признака для определения места повреждения уровня высших гармонических тока повреждения, измеряемого в месте установки защиты [58].

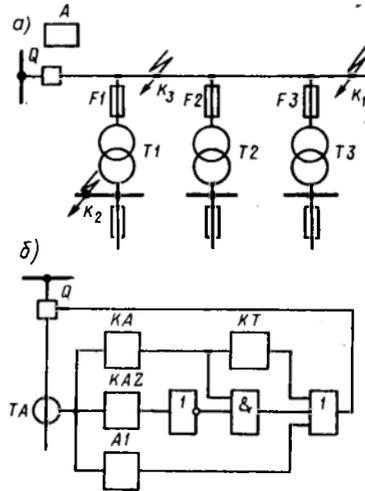


Рис. 5.22. Сельская распределительная сеть (а) и функциональная схема токовой защиты (б)

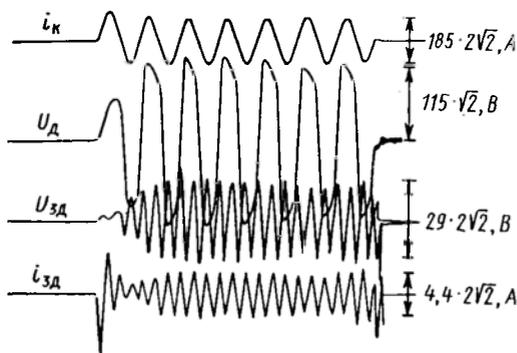


Рис. 5.23. Двухфазное к.з. на стороне 0,4 кВ трансформатора мощностью 160 кВ·А:

i_k — ток короткого замыкания; U_d — напряжение дуги; U_{3d} — напряжение 3-й гармонической дуги; i_{3d} — ток 3-й гармонической тока

третьей гармонической в неповрежденной фазе при замыкании между средней и любой из крайних фаз. Для этого случая в диапазоне напряжений от 0,9 до 1,1 номинального экспериментально определен ток третьей гармонической $I_{3x}^{(2)}$ для трансформаторов 100, 180, 250 кВ·А. На основе этих данных получена эмпирическая зависимость [58]

$$I_{3x}^{(2)} = \left[0,194 + 0,74(U_c - 0,9) + 7,7(U_c - 0,9)^2 \right] \sum I_x, \quad (5.16)$$

где $\sum I_x$ — суммарный ток холостого хода по паспортным данным трансформаторов, подключенных к линии; U_c — напряжение на выводах трансформатора, отнесенное к номинальному напряжению сети.

Расчеты показывают, что ток $I_{3x}^{(2)}$ может составить

$$I_{3x}^{(2)} = (0,2 \dots 0,25) \sum I_x.$$

Исследования в сельских распределительных сетях напряжением 10 кВ показывают, что самым интенсивным источником гармонических тока является электрическая дуга в месте междуфазного короткого замыкания на стороне 0,4 кВ сетевого трансформатора (рис. 5.23). Ток 3-й гармонической, генерируемый дугой при двухфазных коротких замыканиях, определяется по выражению

$$I_{3d}^{(2)} = \left[U_{3d}^{(2)} I \left(2\sqrt{R_k^2 + (3X_k)^2} \right) \right] 10,5/0,4, \quad (5.17)$$

где $U_{3d}^{(2)}$ — напряжение 3-й гармонической дуги 0,4 кВ; $U_{3d}^{(2)} = 30 \dots 50$ В; R_k , X_k — сопротивления расчетной схемы, приведенные к напряжению 10 кВ.

Расчеты показывают, что наименьший ток $I_{3d}^{(2)} = (5 \dots 10) I_{3x}^{(2)}$.

Таким образом, значение 3-й гармонической тока в начальный момент повреждения позволяет отличить короткие замыкания на защищаемой линии от повреждений за трансформатором на стороне 0,4 кВ.

Функциональная схема токовой защиты с контролем уровня 3-й гармонической в токе повреждения показана на рис. 5.22, б. Защита выполнена на микроэлектронной элементной базе. Ее пер-

Основными источниками высших гармонических тока в нормальном режиме распределительных сетей являются сетевые трансформаторы. Ток холостого хода трансформатора содержит 5, 7 и 11-ю гармонические составляющие. Несимметрия магнитной системы трансформатора обуславливает также 3-ю и 9-ю гармонические составляющие тока холостого хода.

При коротком замыкании в распределительной сети напряжением 6—10 кВ, особенно при двухфазном коротком замыкании в начале линии (точка K_3), при котором трансформаторы возбуждаются несимметричным напряжением, 3-я гармоническая I_{3x} тока холостого хода увеличивается. Наибольшее значение имеет ток

вой ступенью является обычная токовая отсечка AI без выдержки времени. Она защищает головной участок линии. Токовая защита с измерительным органом KA в зависимости от действия фильтра-реле тока 3-й гармонической KAZ может работать как максимальная токовая защита с выдержкой времени, создаваемой реле KT , или как защита без выдержки времени. Ток срабатывания измерительного органа выбирают так, чтобы при повреждении в конце защищаемой линии обеспечивался требуемый для максимальной токовой защиты коэффициент чувствительности ($k_{\text{ч}}^{\text{III}} \geq 1,5$). Фильтр-реле KAZ не должно срабатывать при коротких замыканиях на защищаемой линии. Для этого ток срабатывания реле принимается большим тока $I_{3\text{х}}^{(2)}$. Логическая часть защиты состоит из элементов НЕ, И, ИЛИ и органа выдержки времени KT .

При повреждении между предохранителями $F1-F3$ и соответствующим трансформатором $T1-T3$ (рис. 5.22, а), как и при коротком замыкании на линии, защита действует без выдержки времени: она может отключить выключатель раньше, чем перегорит предохранитель. Селективная ликвидация повреждений в этих случаях обеспечивается совместным действием защиты и УАПВ. После АПВ защита срабатывает с выдержкой времени, соответствующей характеристике 3 (рис. 5.24). При повреждении на защищаемой линии время срабатывания защиты определяется характеристикой 1. Короткие замыкания за трансформаторами сопровождаются срабатыванием фильтр-реле KAZ . В этом случае выдержка времени защиты определяется характеристикой 2.

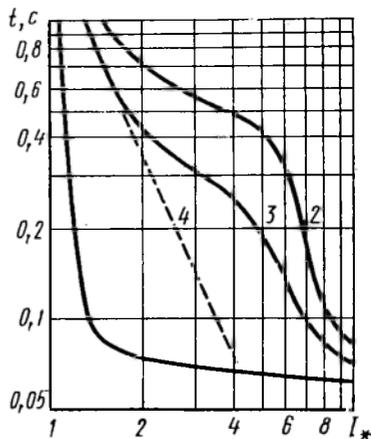


Рис. 5.24. Характеристики защиты с выдержкой времени зависимой от 3-й гармонической тока:

1 — при повреждении на защищаемой линии; 2 — при внешних к. з.; 3 — после действия УАПВ; 4 — защитная характеристика предохранителя

§ 5.10. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА СКОРОСТЬ НАРАСТАНИЯ ИЛИ АБСОЛЮТНОЕ ПРИРАЩЕНИЕ ТОКА

В электрических установках постоянного тока, например в тяговой сети, минимальный ток к.з. часто оказывается соизмерим с максимальным током нагрузки. В этом случае выполнить токовую защиту, реагирующую на абсолютное значение тока, оказывается весьма трудно. Короткие замыкания в таких установках сопровождаются переходными процессами, которые, в частности, характеризуются скоростью нарастания тока di/dt и абсолютным приращением тока ΔI [5, 6, 26]. Если в защищаемую линию включить трансформатор тока (рис. 5.25), то вследствие этих изменений постоянного тока во вторичной обмотке TA индуцируется ЭДС $e = M(di/dt)$. При этом характер изменения тока i_p и

реле определяется сопротивлениями R и L вторичной цепи, для которой $e = Ri_p + L(di_p/dt) = M(di/dt)$, или

$$i_p + T(dt_p/dt) = (M/R)(di/dt), \quad (5.18)$$

где $T = L/R$ — постоянная времени вторичной цепи TA .

Если $R \gg L$ ($T \approx 0$), то из (5.18) ток в реле $i_p = (M/R)(di/dt)$, т. е. i_p пропорционален скорости нарастания тока в защищаемой линии. При $L \gg R$ в выражении (5.18) можно пренебречь первым членом (i_p). В этом случае $di_p = (M/L)di$. Ток i изменяется от значения I_1 в начале переходного процесса до значения I_2 в конце переходного процесса, т. е.

$$i_p = (M/L) \int_{I_1}^{I_2} di \quad \text{или} \quad i_p = (M/L)(I_2 - I_1).$$

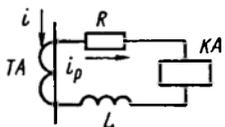


Рис. 5.25. Схема включения реле, реагирующего на скорость изменения или абсолютные приращения тока в сети постоянного тока

Таким образом, в зависимости от значения L и R можно выполнить токовую защиту для электроустановок постоянного тока, реагирующую на скорость нарастания тока, и защиту, реагирующую на абсолютное приращение тока [5, 26].

§ 5.11. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ СЕТЕЙ С ГЛУХОЗАЗЕМЛЕННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ

Защита обычно выполняется трехступенчатой. В случае недостаточной чувствительности она дополняется четвертой ступенью [59]. Измерительными органами защиты являются реле тока, подключенные к фильтру тока нулевой последовательности. В остальном схема защиты выполняется аналогично рассмотренным выше схемам токовой защиты с включением измерительных органов на полные токи фаз (см. § 5.7). Использование тока нулевой последовательности в качестве воздействующей величины позволяет повысить чувствительность токовой защиты к коротким замыканиям на землю и уменьшить выдержку времени ее последней ступени. В радиальной сети с односторонним питанием (рис. 5.26, а) короткие замыкания на землю возникают на участках, ограниченных обмотками трансформаторов $T1—T3$, соединенных в звезду. При этом путь прохождения тока нулевой последовательности определяется заземленными нейтральями. В рассматриваемой схеме ток нулевой последовательности проходит по поврежденному участку через заземленную нейтраль трансформатора $T1$ и точку короткого замыкания. На линиях AB и BB и трансформаторах $T1—T3$ установлены токовые защиты $A2—A5$ от междуфазных повреждений и токовые защиты нулевой последовательности $A_02—A_05$ от коротких замыканий на землю.

Рассмотрим токовую защиту нулевой последовательности A_02 линии AB . Расчет параметров ее I и II ступеней имеет много обще-

го с расчетом I и II ступеней защиты от междуфазных к.з. A2 (см. § 5.3; 5.4).

Первая ступень защиты — токовая отсечка нулевой последовательности без выдержки времени. Ее ток срабатывания $I_{с.з. A_0 2}^I$ выбирается по условиям отстройки от максимального значения периодической составляющей утроенного начального тока ну-

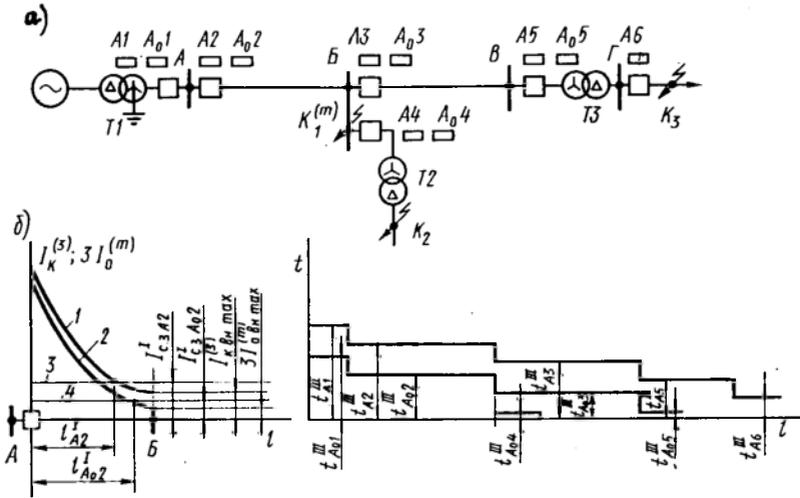


Рис. 5.26. Характеристики выдержек времени токовой защиты нулевой последовательности и максимальной токовой защиты

левой последовательности $3I_{\text{овн max}}^{(m)}$, проходящего в месте установки защиты при коротких замыканиях на землю ($K^{(1)}$ и $K^{(1,1)}$) на шинах приемной подстанции B (точка $K_1^{(m)}$):

$$I_{с.з. A_0 2}^I = k_{\text{отс}}^I 3I_{\text{овн max}}^{(m)} \quad (5.19)$$

где $k_{\text{отс}}^I = 1,3$ при использовании реле РТ-40 для линий 110—220 кВ.

При этом токовая отсечка не должна срабатывать от токов нулевой последовательности, кратковременно появляющихся при одновременном включении фаз выключателя, например в цикле быстродействующего АПВ. Обычно в схеме защиты имеется выходное промежуточное реле, создающее замедление около трех-четырех периодов, поэтому отсечка оказывается отстроенной от этих токов по времени. Необходимо исключить также ложные срабатывания защиты в неполнофазном режиме, возникающем в цикле офнофазного АПВ на защищаемой линии [10]. Отстройка от уравнительного тока при качаниях не требуется, так как в нем нет составляющей тока нулевой последовательности. Преимущество токовой отсечки нулевой последовательности перед токовой отсечкой, включенной на полные

токи фаз, — в ее большей защитоспособности. Она имеет большую защищаемую зону $I_{A_0 2} > I_{A_2}$ (рис. 5.26, б). Объясняется это тем, что ток нулевой последовательности $3I_0^{(m)}$ (кривая 2) при перемещении точки к.з. вдоль линии AB изменяется более резко, чем ток трехфазного короткого замыкания $I_{K^{(3)}}$ (кривая 1). Разный характер изменения токов является следствием неравенства сопротивлений нулевой $Z_{0л}$ и сопротивления прямой $Z_{1л}$ последовательностей линии ($Z_{0л} > Z_{1л}$).

Вторая ступень защиты — токовая отсечка нулевой последовательности с выдержкой времени. При выборе параметров защиты $I_{с.з. A_0 2}^{II}$ и $t_{A_0 2}^{II}$ необходимо осуществить отстройку от первой ступени $A_0 3$ защиты нулевой последовательности линии BV и от защиты нулевой последовательности $A_0 4$ трансформатора $T2$. Из сказанного следует, что для тока срабатывания должны выполняться условия

$$I_{с.з. A_0 2}^{II} \geq k_{отс}^{II} I_{с.з. A_0 3}^{II} \text{ и } I_{с.з. A_0 2}^{II} \geq k_{отс}^{II} I_{с.з. A_0 4}^{II} \quad (5.20)$$

где $k_{отс}^{II} = 1,1$.

Из двух значений принимается большее. Выдержка времени, как и выдержка времени второй ступени токовой защиты (см. § 5.4), обычно не превышает 0,5 с.

Третья ступень защиты — максимальная токовая защита нулевой последовательности. Из рассмотрения схемы радиальной сети (рис. 5.26, а) следует, что при повреждениях на землю в точках K_2 и K_3 ток нулевой последовательности с высшей стороны трансформаторов $T2$ и $T3$ отсутствует, поэтому защиту $A_0 4$ и $A_0 5$ можно выполнить без выдержки времени ($t_{A_0 4}^{III} \approx 0$; $t_{A_0 5}^{III} \approx 0$), а выдержки времени $t_{A_0 1}^{III}$; $t_{A_0 2}^{III}$ и $t_{A_0 3}^{III}$ защит $A_0 1$ — $A_0 3$ выбрать по ступенчатому принципу. На рис. 5.26, а изображены также характеристики выдержек времени $t_{A_1}^{III}$ — $t_{A_6}^{III}$ токовых защит $A1$ — $A6$. Из сопоставления характеристик следует, что токовую защиту нулевой последовательности можно выполнить более быстродействующей, чем токовую защиту с включением реле на полные токи фаз.

В нормальном режиме и при многофазных повреждениях в реле проходит только ток небаланса $I_{нб}$, поэтому ток срабатывания реле можно выбирать без учета рабочих токов по условию

$$I_{с.р}^{III} > I_{нб.рсч} \quad (5.21)$$

При определении расчетного тока небаланса $I_{нб.рсч}$ следует иметь в виду, что он возрастает с увеличением первичного тока, достигая максимального значения при трехфазных коротких замыканиях. Поэтому в случае, когда $t_{A_0 2}^{III} \leq t_{A_3}^{III}$, ток срабатывания реле защиты нулевой последовательности должен быть больше максимального тока небаланса при внешних трехфазных коротких замыканиях, для того чтобы исключить неселективное действие за-

щиты. Расчет тока небаланса довольно сложен [59]. С некоторыми допущениями он определяется исходя из максимальной погрешности трансформаторов тока $\epsilon = 10\%$ и с учетом коэффициента их однотипности $k_{\text{одн}} = 0,5 \dots 1,0$ по выражению

$$I_{\text{нб.реч}} = I_{\text{нб.реч макс}} = k_{\text{одн}} (\epsilon/100) I_{\text{к.вн макс}}^{(3)} / K_I, \quad (5.22)$$

где $I_{\text{к.вн макс}}^{(3)}$ — действующее значение установившегося тока внешнего трехфазного короткого замыкания при повреждении в начале следующего участка (для защиты A_02 в точке $K_1^{(m)}$).

Ток установившегося режима короткого замыкания принимается потому, что защита действует с выдержкой времени, достаточной для затухания апериодической составляющей.

В тех случаях, когда выдержка времени защиты не превышает $t_{\text{с.з}} = 0,3$ с, при определении тока небаланса $I_{\text{нб.реч}}$, следует учитывать и апериодическую составляющую тока короткого замыкания коэффициентом $k_{\text{ап}}$:

$$I_{\text{нб.реч макс}} = k_{\text{одн}} k_{\text{ап}} (\epsilon/100) I_{\text{к.вн макс}}^{(3)} / K_I, \quad (5.23)$$

где $k_{\text{ап}} = 2$ при времени действия защиты до $t_{\text{с.з}} = 0,1$ с и $k_{\text{ап}} = 1,5$ при $0,1 \leq t_{\text{с.з}} \leq 0,3$ с.

В рассматриваемом случае при определении тока срабатывания реле коэффициент возврата $k_{\text{в}}$ не учитывается, так как при внешних многофазных коротких замыканиях измерительный орган защиты не срабатывает, а при отключении внешних коротких замыканий на землю, при возникновении которых реле может сработать, ток нулевой последовательности исчезает. Таким образом,

$$I_{\text{с.р}}^{\text{III}} = k_{\text{отс}}^{\text{III}} I_{\text{нб.реч макс}}, \quad (5.24)$$

где $k_{\text{отс}}^{\text{III}} = 1,25$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность и необходимый запас.

Чувствительность защиты можно повысить, если принять $t_{A_02}^{\text{III}} > t_{A_3}^{\text{III}}$. При этом внешние многофазные короткие замыкания отключаются со временем, меньшим времени действия токовой защиты нулевой последовательности. Поэтому достаточно ее ток срабатывания выбирать по расчетному току небаланса в нормальном режиме $I_{\text{нб.реч}} = I_{\text{нб.нрм}}$. Ток $I_{\text{нб.нрм}}$ значительно меньше тока $I_{\text{нб.реч макс}}$, поэтому при внешних многофазных коротких замыканиях измерительный орган защиты срабатывает. Для обеспечения возврата реле после отключения внешних коротких замыканий при выборе тока срабатывания учитывается коэффициент возврата $k_{\text{в}}$:

$$I_{\text{с.р}}^{\text{III}} = k_{\text{отс}}^{\text{III}} I_{\text{нб.нрм}} / k_{\text{в}}. \quad (5.25)$$

В выражении (5.25) коэффициенты $k_{\text{отс}}^{\text{III}}$ и $k_{\text{в}}$ принимаются равными соответствующим коэффициентам максимальной токовой защиты с включением реле на полные токи фаз. Ток $I_{\text{нб.нрм}}$ находят путем измерения; в зависимости от класса

трансформаторов тока, однотипности их характеристик и нагрузки он находится в пределах $0,01 < I_{\text{нб.нрм}} < 0,1 \text{ А}$, т. е. ток срабатывания защиты значительно меньше рабочих токов защищаемой линии.

Таким образом, по сравнению с защитами, включенными на полные фазные токи, защита нулевой последовательности может иметь меньшие выдержки времени и повышенную чувствительность. В связи с этим она находит широкое применение в сетях с глухозаземленными нейтральными в качестве защиты от коротких замыканий на землю.

Глава 6

ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ

§ 6.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ, ОСНОВНЫЕ ОРГАНЫ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ И ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Для селективного действия в сетях с двусторонним питанием токовая защита дополняется измерительным *органом направления мощности КВ*. Такая защита называется *токовой направленной*.

Она, как и токовая, обычно выполняется трехступенчатой с относительной селективностью. Ранее отмечалось (см. § 5.3; 5.4), что первая и вторая ступени токовой защиты сохраняют селективность в сетях с двусторонним питанием, поэтому они могут и не иметь органов направления мощности. В отличие от токовой защиты токовая направленная благодаря реле *КВ* реагирует не только на абсолютное значение тока в защищаемом элементе, но и на его фазу относительно напряжения на шинах у места установки защиты, т. е. действует в зависимости от направления мощности при коротких замыканиях. Селективное действие защиты обеспечивается соответствующим включением органа направления мощности и выбором выдержки времени. Размещение защит

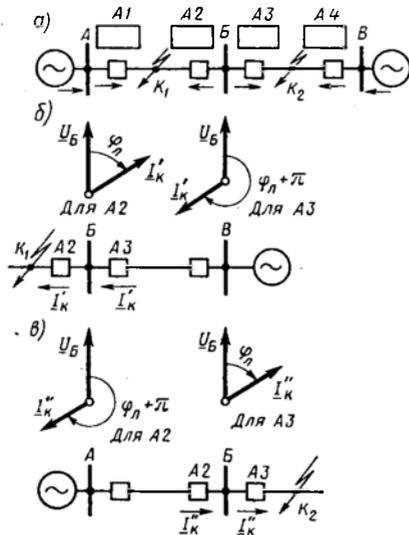


Рис. 6.1. Размещение защит в сеге и векторные диаграммы, поясняющие действие токовой направленной защиты

$A1 - A4$ показано на рис. 6.1, а. Из рассмотрения векторных диаграмм напряжения и тока (рис. 6.1, б, в) следует, что фаза тока в месте включения защит $A2$ и $A3$ относительно напряжения \underline{U}_B на шинах подстанции B при перемещении повреждения из точки K_1 в точку K_2 дискретно изменяется на угол π . При построении векторных диаграмм за положительное направление мгновенного значения тока принято направление от шин в сторону линии (рис. 6.1, а). Угол φ_l сдвига фаз тока \underline{I}_k относительно напряжения считается положительным при отстающем токе и отрицательным при опережающем токе. Защиту $A2$ необходимо выполнить так, чтобы она действовала на отключение только при углах сдвига фаз между током и напряжением, соответствующих короткому замыканию в точке K_1 , а защиту $A3$ — при повреждении в точке K_2 . Из этого следует, что реле направления мощности при подведении к нему напряжения $\underline{U}_p = \underline{U}_B$ и тока $\underline{I}_p = \underline{I}'_k$ (рис. 6.1, б) и $\underline{I}_p = \underline{I}''_k$ (рис. 6.1, в) должно срабатывать при угле φ_p между \underline{U}_p и \underline{I}_p , равном φ_l , и не срабатывать при $\varphi_p = (\varphi_l + \pi)$. При коротком замыкании в точке K_1 векторная диаграмма напряжения и тока у места установки защиты $A4$ такая же, как и у места установки защиты $A2$, в связи с чем приходит в действие и защита $A4$. Поэтому для селективного отключения линии AB необходимо согласовать между собой параметры этих защит. Точно так же должны быть согласованы параметры защиты $A1$ и защиты $A3$. Благодаря органу направления мощности все защиты разбиваются на две группы ($A2, A4$ и $A1, A3$), не связанные между собой. В пределах каждой группы параметры выбирают, как для токовых защит.

Первая ступень защиты. У токовой направленной защиты первая ступень может быть ненаправленной, оставаясь обычной токовой отсечкой без выдержки времени. Выбор ее тока срабатывания для защиты линии с двусторонним питанием рассмотрен выше (см. § 5.3). Необходимость в органе направления мощности появляется, если требуется повысить чувствительность токовой отсечки. Так, например (см. рис. 5.7), направленной целесообразно выполнить отсечку $A1$, при этом с коротким замыканием в точке K_A можно не считаться и ток срабатывания $I_{с.з. A1}$ токовой направленной отсечки $A1$ отстроить только от максимального тока внешнего короткого замыкания $I_{к.вн. \max A}$. Таким образом, на линии с двусторонним питанием направленной может быть только одна из токовых отсечек. Некоторые особенности имеет токовая направленная защита на линиях постоянного тока электрифицированного транспорта. В таких сетях для предотвращения пережога провода электрической дугой при к.з. время отключения поврежденного участка не должно превышать 0,1 с. Поэтому для выполнения токовой направленной защиты применяют быстродействующие поляризованные автоматические выключатели, например типа АБ 2/3 (см. § 2.3), полное время отключения которых не превышает 0,08 с.

На основе этих выключателей невозможно выполнить токовую направленную защиту со ступенчатой характеристикой выдержки времени, поэтому в тяговых сетях постоянного тока токовая направленная защита содержит только первую ступень — токовую направленную отсекку — и ее стремятся выполнить так, чтобы она защищала всю линию. Характерны для таких сетей соизмеримость токов к.з. и максимальных токов нагрузки, поэтому для выполнения защиты, срабатывающей при коротких замыканиях и не дей-

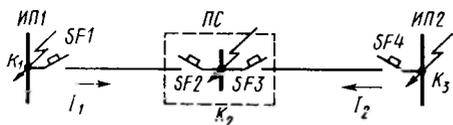


Рис. 6.2. Тяговая сеть постоянного тока с быстродействующими поляризованными автоматическими выключателями

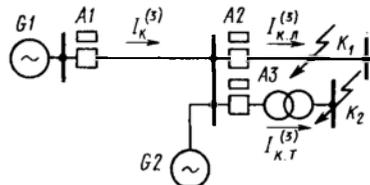


Рис. 6.3. Учет коэффициентов токораспределения при выборе тока срабатывания второй ступени токовой направленной защиты

ствующей в нормальных режимах работы, линию между двумя источниками питания ИП1 и ИП2 приходится секционировать. Пост секционирования (ПС) располагают примерно в середине линии (рис. 6.2). Для автоматических выключателей SF1—SF4 при выборе тока срабатывания должно выполняться условие [5, 26].

$$I_{\text{раб max}} + 150 \leq I_{\text{с.з}}^1 \leq I_{\text{к min}} - (250 \dots 350). \quad (6.1)$$

Ток $I_{\text{раб max}}$ определяется ориентировочно по вероятному числу поездов в пределах защищаемой линии, один из которых находится в режиме трогания. Минимальный ток повреждения $I_{\text{к min}}$ — ток в месте установки автоматического выключателя при к.з. в расчетной точке. Для автоматических выключателей SF1 и SF4 расчетной точкой является точка K_2 , для выключателя SF2 — точка K_1 , а для SF3 — точка K_3 . При таком выборе тока срабатывания возможны как неселективные действия автоматических выключателей SF1, SF4, так и наличие незащищенных зон у поста секционирования.

Вторая ступень защиты. Условия выбора параметров второй ступени такие же, как и условия выбора параметров токовой отсекки с выдержкой времени ненаправленных токовых защит. Это значит, что вторая ступень защиты A1 (рис. 6.3) должна быть отстроена по времени от первых ступеней защит A2 всех отходящих от шин противоположной подстанции линий и от быстродействующих защит A3 трансформаторов, подключенных к этим шинам, а ее ток срабатывания должен быть выбран по наибольшему из токов к.з. $I_{\text{к}}^{(3)}$, проходящих по защищаемой линии при повреждении в конце за-

щищаемых зон первых ступеней отходящих линий (точка K_1) и при коротком замыкании на шинах низшего напряжения трансформаторов (точка K_2). Выдержка времени обычно не превышает 0,5 с, а при выборе тока срабатывания приходится учитывать так называемые токи «подпитки». Из рассмотрения рис. 6.3 следует, что при коротких замыканиях в точках K_1 и K_2 ток $I_{к(3)}$, проходящий в месте установки защиты $A1$, оказывается меньше токов $I_{к.л}^{(3)}$ и $I_{к.т}^{(3)}$ за счет тока «подпитки» от генератора $G2$. Отношения $I_{к(3)}/I_{к.л}^{(3)} =$

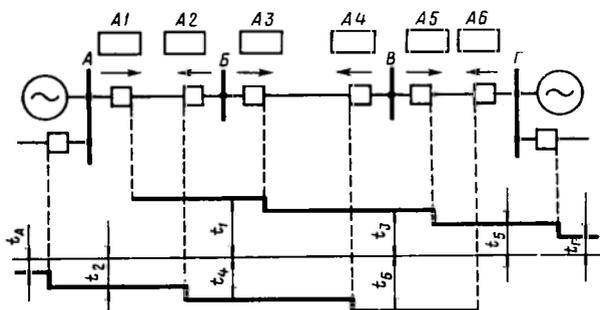


Рис. 6.4. Встречно-ступенчатый принцип выбора выдержки времени максимальной токовой направленной защиты

$= k_{р.л}$ и $I_{к(3)}/I_{к.л}^{(3)} = k_{р.т}$ называются *коэффициентами токораспределения*. Их необходимо учесть при выборе тока срабатывания второй ступени защиты $A1$ линии $АБ$:

$$\left. \begin{aligned} I_{с.зА1}^{II} &\geq k_{отс}^{II} k_{р.л} I_{с.зА2}^I \\ I_{с.зА1}^{II} &\geq k_{отс}^{II} k_{р.т} I_{к.т}^{(3)} \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

Третья ступень защиты — максимальная токовая направленная защита. Выбор параметров защиты рассмотрим на примере использования ее в сети, показанной на рис. 6.4.

Выбор выдержки времени. Стрелками (рис. 6.4) указано направление мощности, при котором органы направления мощности разрешают защитам срабатывать. С учетом этого защиты объединены в две группы: $A2, A4, A6$ и $A5, A3, A1$. В пределах каждой группы выдержки времени выбираются, как у максимальной токовой защиты, по ступенчатому принципу. Минимальную выдержку времени имеют защиты $A2$ и $A5$. Они отстраиваются по времени от защит других присоединений соответственно подстанций A и $Г$. В каждой группе защит выдержка времени увеличивается по мере приближения к источникам питания на величину Δt . На рис. 6.4 построены характеристики максимальных токовых направленных защит с независимой выдержкой времени. Принято счи-

тать, что выдержки времени максимальных токовых направленных защит выбираются по *встречно-ступенчатому принципу*.

Учитывая поведение реле направления мощности, можно убедиться в селективном действии защиты при коротком замыкании в любой точке рассматриваемой сети. Селективность не нарушается, если некоторые защиты выполнить без органа направления мощности. В действительности нет необходимости снабжать органом направления мощности защиту *A3*, так как в рассматриваемом случае она отстроена от защиты *A2* по времени. По такой же при-

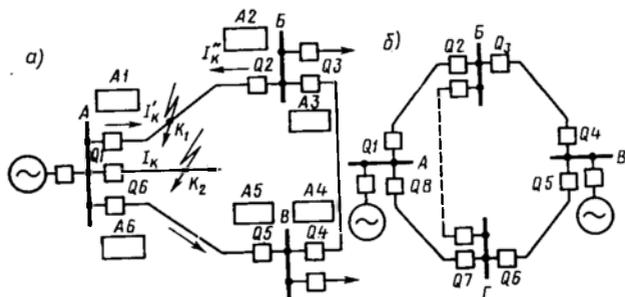


Рис. 6.5. Размещение и особенности работы максимальной токовой направленной защиты в кольцевых сетях

чине без органа направления мощности можно выполнить защиты *A4*, *A1* и *A6* ($t_4^{III} > t_5^{III}$; $t_1^{III} > t_4^{III}$; $t_6^{III} > t_7^{III}$).

В общем случае при наличии на подстанции нескольких присоединений защита, имеющая наибольшую выдержку времени, может не иметь органа направления мощности, так как селективность ее действия при коротких замыканиях на других присоединениях обеспечивается выдержкой времени.

В кольцевых сетях с одним источником питания (рис. 6.5, *a*) выдержки времени максимальных токовых направлениях защит также выбирают по *встречно-ступенчатому принципу*. При этом, однако, защиты *A2* и *A5*, установленные на приемных сторонах головных участков *AB* и *AB'*, можно выполнить действующими без выдержки времени. Такая возможность определяется направлением мощности в этих защитах. При нормальной работе, а также при внешних коротких замыканиях на участках кольца и других присоединениях подстанций *B* и *B'*, мощность у места установки защит *A2* и *A5* всегда направлена от линий к шинам, поэтому их органы направления мощности препятствуют срабатыванию. Защиты также не срабатывают при повреждениях вне кольца на других присоединениях подстанции *A*, так как ток повреждения при этом по кольцу не проходит. Только при коротких замыканиях на защищаемых линиях *AB* и *AB'* органы направления мощности защит *A2* и *A5* срабатывают и защиты смогут подействовать на отключение.

Это дает возможность выполнить их действующими без выдержки времени и принципиально отказаться от измерительных органов тока.

При коротком замыкании на головном участке AB вблизи шин подстанции A , например в точке K_1 , ток к.з. в точку повреждения в основном проходит через выключатель $Q1$ (ток $I_{K'}$). Только небольшая доля тока к.з., равная $I_{K''}$, замыкается по кольцу. При приближении точки повреждения K_1 к шинам A ток $I_{K''}$ уменьшается и при некотором расстоянии между точкой K_1 и подстанцией A становится меньше тока, необходимого для срабатывания защиты $A2$. Защита $A2$ срабатывает только после отключения защитой $A1$ выключателя $Q1$, когда весь ток повреждения проходит по кольцу. Таким образом, при повреждении в пределах некоторой зоны, расположенной в рассматриваемом случае у шин A , защита $A2$ действует всегда только после срабатывания защиты $A1$ независимо от соотношения их выдержек времени. Такое поочередное действие защит, как уже известно, называется каскадным, а указанная зона — *зоной каскадного действия*. В общем случае эта зона может распространяться на линии, смежные с головными участками.

При каскадном действии защит время отключения поврежденного участка увеличивается. Кроме того, может происходить неправильная работа защит $A4$ и $A6$, органы направления мощности которых при коротком замыкании в точке K_1 находятся в состоянии после срабатывания. Неправильное действие может произойти в том случае, если их токи срабатывания $I_{с.34}^{III}$ и $I_{с.36}^{III}$ меньше тока $I_{K''}$, а ток срабатывания $I_{с.32}^{III}$ защиты $A2$ — больше $I_{K''}$. Поэтому желательно сокращение зоны каскадного действия.

На рис. 6.5, б показана кольцевая сеть с двумя источниками питания. В такой сети встречно-ступенчатый принцип выбора выдержки времени не обеспечивает селективного действия защиты. Это трудно осуществить и в кольцевой сети с одним источником питания, если имеются диагональные связи, не проходящие через шины источника питания (связь между шинами B и $Г$, показанная штриховой линией).

Выбор тока срабатывания. Ток срабатывания максимальной токовой направленной защиты, как и рассмотренной выше (см. § 5.5) максимальной токовой (ненаправленной) защиты, должен удовлетворять условию

$$I_{с.3}^{III} \geq (k_{отс}^{III} k_{сзу}/k_B) I_{\text{раб max}} \quad (6.3)$$

Однако в отличие от максимальной токовой защиты при определении максимального рабочего тока $I_{\text{раб max}}$ можно учитывать только максимальный режим, соответствующий направлению мощности от шин в линию. При этом может оказаться, что в режиме передачи мощности от линии к шинам измерительный орган тока срабатывает, однако защита в целом не подействует из-за органа направления мощности. Как уже отмечалось, в таких условиях находятся

защиты А2 и А5 (рис. 6.5, а), установленные с приемной стороны головных участков кольцевой сети.

При снижении тока срабатывания защиты необходимо учитывать возможность нарушения цепей напряжения и вследствие этого переориентацию органа направления мощности. Поэтому в схему защиты включается устройство контроля исправности цепей напряжения (см. § 1.2), если ток срабатывания измерительного органа тока не отстроен от максимальной нагрузки при ее направлении к шинам. Устройство контроля исправности цепей напряжения должно при срабатывании выводить защиту из действия. Если режим максимальной нагрузки при ее направлении к шинам проявляется редко, то устройство контроля исправности цепей напряжения может действовать на сигнал. При этом ток срабатывания $I_{с.з}^{III}$ должен быть больше рабочего тока при нормальной работе вне зависимости от направления мощности:

$$I_{с.з}^{III} \geq (k_{отс}^{III}/k_B) I_{раб}. \quad (6.4)$$

В сетях с глухозаземленными нейтральными при коротком замыкании на землю возможны срабатывания реле направления мощности, включенных на токи неповрежденных фаз при направлении мощности к.з. к шинам [10, 60]. Поэтому при выборе тока срабатывания защиты кроме двух условий (6.3) и (6.4) должно выполняться третье, по которому $I_{с.з}^{III}$ должен быть больше максимального тока неповрежденных фаз:

$$I_{с.з}^{III} \geq k_{отс}^{III} I_{нп\ max}. \quad (6.5)$$

Условие (6.5) не учитывается, если защита выполняется так, что при коротких замыканиях на землю она автоматически выводится из действия.

Как уже отмечалось, возможно нарушение селективности защиты в режиме каскадного действия. Во избежание этого при выборе тока срабатывания необходимо согласовывать чувствительность защит смежных участков. Это согласование, как и выбор выдержек времени, проводится только для защит, входящих в одну группу, например А2, А4 и А6 (рис. 6.5, а), причем защита, имеющая меньшую выдержку времени, должна иметь и меньший ток срабатывания, т. е. $I_{с.з2}^{III} < I_{с.з4}^{III} < I_{с.з6}^{III}$. В общем случае в пределах каждой группы защит должно выполняться условие

$$I_{с.з\ n}^{III} \geq k_{отс}^{III} I_{с.з\ (n-1)}^{III}. \quad (6.6)$$

Таким образом, токи срабатывания, как и выдержки времени, должны удовлетворять встречно-ступенчатому принципу и выбираться по условию, дающему большее значение тока.

Мертвая зона токовой направленной защиты. Как уже отмечалось (см. § 2.6), действие реле направления мощности определя-

ется углом сдвига фаз φ_p . Однако для срабатывания реле необходимо, чтобы подводимое к нему напряжение было не меньше $U_{c.p.min}$. Соответствующим включением реле это обеспечивается при всех несимметричных коротких замыканиях в любой точке защищаемой линии. Мертвая зона практически образуется только при металлических трехфазных коротких замыканиях на небольшом участке $l_{м.з}$, расположенном у места включения реле.

При коротком замыкании в конце мертвой зоны остаточное междуфазное напряжение у места включения реле

$$U_{ост}^{(3)} = U_p = \sqrt{3} I_k^{(3)} Z_{1уд} l_{м.з} / K_U,$$

где $Z_{1уд}$ — полное удельное электрическое сопротивление прямой последовательности линии, Ом/км.

Для угла максимальной чувствительности $U_p = U_{c.p.min}$ (см. § 2.6). В общем случае угол φ_p отличается от угла максимальной чувствительности, поэтому при трехфазном коротком замыкании в конце мертвой зоны выполняется условие $U_p = U_{c.p.min} / \cos(\varphi_p + \alpha)$. С учетом этого из соотношения для определения $U_{ост}^{(3)}$ получается выражение для мертвой зоны реле направления мощности:

$$l_{м.з} = K_U U_{c.p.min} / [\sqrt{3} I_k^{(3)} Z_{1уд} \cos(\varphi_p + \alpha)]. \quad (6.7)$$

Выражение (6.7) справедливо при больших кратностях тока $I_k^{(3)}$, при которых $U_{c.p.min}$ остается практически постоянным. В общем случае длина $l_{м.з}$ определяется исходя из необходимости иметь минимальную мощность срабатывания $S_{c.p.min}$. Учитывая, что

$$S_{c.p.min} = U_{c.p.min} I_k^{(3)} / K_I,$$

можно получить из (6.7)

$$l_{м.з} = K_U K_I S_{c.p.min} / [\sqrt{3} Z_{1уд} (I_k^{(3)})^2 \cos(\varphi_p + \alpha)]. \quad (6.8)$$

Наличие мертвой зоны является недостатком направленной защиты, хотя длина этой зоны, как правило, невелика.

Токовая направленная защита нулевой последовательности. Она отличается от рассмотренной ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности (см. § 5.11) наличием органа направления мощности, который включается на составляющие нулевой последовательности U_0 и I_0 . Параметры защиты выбирают так же, как параметры ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности. Наличие органа направления мощности позволяет учитывать только режимы, при которых направление мощности соответствует к.з. в защищаемых зонах (см. § 5.11). Защита не имеет мертвой зоны.

§ 6.2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ

Реле направления мощности, в частности индукционные, должны включаться таким образом, чтобы сочетание токов и напряже-

ний, подводимых к реле, обеспечивало положительный и достаточный для срабатывания вращающий момент при различных видах коротких замыканий на защищаемом элементе. В схемах токовых направленных защит реле направления мощности включается на полные токи и напряжения фаз, а в схемах токовых направленных защит нулевой последовательности — на составляющие нулевой последовательности \underline{U}_0 и \underline{I}_0 . Используются также схемы с включением реле на составляющие обратной последовательности \underline{U}_2 и \underline{I}_2 .

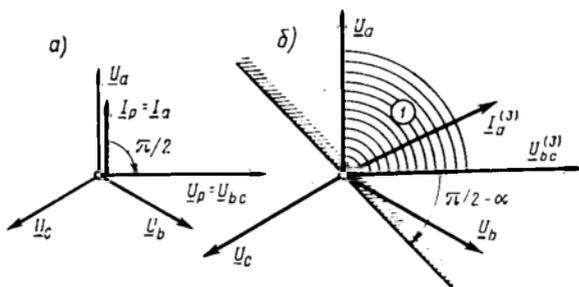


Рис. 6.6. Векторные диаграммы напряжений и токов при 90-градусной схеме включения реле направления мощности

Схема включения реле на полные токи и напряжения фаз. В настоящее время является типовой так называемая 90-градусная схема. Название схемы носит условный характер и определяется углом φ_p между напряжением \underline{U}_p и опережающим его током \underline{I}_p , подведенными к одному и тому же реле в симметричном трехфазном режиме; при этом предполагается, что ток в фазе совпадает с одноименным фазным напряжением (рис. 6.6, а). Сочетания токов и напряжений при 90-градусной схеме включения реле приведены ниже:

Реле	$KW1$	$KW2$	$KW3$
Ток \underline{I}_p	\underline{I}_a	\underline{I}_b	\underline{I}_c
Напряжение \underline{U}_p	\underline{U}_{bc}	\underline{U}_{ca}	\underline{U}_{ab}

В 90-градусной схеме включения обычно применяют реле смешанного типа с углом $\alpha = \pi/4$. Анализ поведения реле направления мощности при различных видах повреждения можно проводить как аналитическим, так и графическим методами.

В качестве примера целесообразно рассмотреть поведение индукционного реле при трехфазном коротком замыкании, используя графический метод. Согласно 90-градусной схеме включения, к реле, например $KW1$, подводятся ток $\underline{I}_p = \underline{I}_a^{(3)}$ и напряжение $\underline{U}_p = \underline{U}_{bc}^{(3)}$ (рис. 6.6, б). Положение вектора тока \underline{I}_p на векторной диаграмме определяется соотношением активного и реактивного сопротивлений линии от места включения реле до точки к.з. и активным переход-

ным сопротивлением электрической дуги в месте повреждения. Эти соотношения могут изменяться. При этом вектор тока поворачивается на тот или иной угол, не выходя за пределы зоны, обозначенной на векторной диаграмме (рис. 6.6, б) цифрой 1. Граница этой зоны определяется, с одной стороны, положением вектора тока $\underline{I}_p = \underline{I}_a^{(3)}$ при чисто активном, а с другой стороны, при чисто индуктивном сопротивлении. Зона работы реле определяется положением *линии нулевой чувствительности*, которая (см. § 2.6) проводится под углом $(\pi/2 - \alpha)$ к вектору напряжения \underline{U}_p (отсчитываемому по часовой стрелке). При этом, как следует из векторной диаграммы, реле всегда имеет положительный вращающий момент, так как вектор тока $\underline{I}_a^{(3)}$ и вектор напряжения $\underline{U}_{bc}^{(3)}$ располагаются в зоне срабатывания реле при всех возможных соотношениях активного и индуктивного сопротивлений участка линии от места включения реле до точки к.з. Оно может отказать (не сработать) только при коротких замыканиях в мертвой зоне. Два других реле направления мощности $KW2$ и $KW3$, включенные по 90-градусной схеме, находятся в аналогичных условиях.

Анализ поведения реле при различных видах повреждения показывает [13, 60], что при 90-градусной схеме оно обладает следующими свойствами: четко срабатывает при всех видах коротких замыканий при включении на ток поврежденной фазы; может иметь мертвую зону только при трехфазных коротких замыканиях; может срабатывать неправильно при двухфазных и однофазных коротких замыканиях на землю (реле, включенное на ток неповрежденной фазы). Поэтому для исключения неправильного действия всей защиты применяется пофазный пуск, а токи срабатывания ее третьей ступени выбираются с учетом отстройки от токов в неповрежденных фазах. Это приводит к уменьшению чувствительности защиты, так как в сетях с глухозаземленными нейтральными токи в неповрежденных фазах при коротких замыканиях на землю, складываясь из тока нагрузки и тока повреждения, оказываются значительными. Если требуется повысить чувствительность защиты, то ее схему выполняют так, что при коротком замыкании на землю защита автоматически выводится из действия, а повреждение отключается специальной защитой. Следует отметить, что реле может сработать неправильно при коротких замыканиях за трансформатором с соединением обмоток звезда — треугольник. Однако опыт эксплуатации показывает, что такие неправильные действия защиты маловероятны. Поэтому никаких мероприятий, предотвращающих эти действия, не предусматривается.

Включение реле на составляющие нулевой последовательности. При коротком замыкании на землю в полных напряжениях и токах фаз появляются составляющие нулевой последовательности \underline{U}_0 и \underline{I}_0 , связанные между собой соотношением

$$\underline{U}_0 = \underline{E}_0 - \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = -\underline{I}_0 \underline{Z}_0, \quad (6.9)$$

поскольку ЭДС нулевой последовательности генератора $E_0 = 0$.

В (6.9) \underline{Z}_0 — результирующее сопротивление нулевой последовательности, принимаемое обычно равным индуктивному сопротивлению $\underline{Z}_0 = jX_0$, Ом.

В соответствии с (6.9) на рис. 6.7, а показано распределение напряжения \underline{U}_0 между точкой повреждения $K^{(1)}$ и генерирующим источником при однофазном коротком замыкании (ток \underline{I}_0 имеет положительное направление). Напряжение \underline{U}_{0p} в месте включения реле можно определить как падение напряжения в сопротивлении нулевой последовательности $\underline{Z}_{0т}$ трансформатора: $\underline{U}_{0p} = -\underline{I}_0 \underline{Z}_{0т}$.

Обмотки реле направления мощности KWZ_0 подключаются к фильтру напряжения и фильтру тока нулевой последовательности (рис. 6.7, б). Поэтому $\underline{U}_p = 3\underline{U}_{0p}$ и $\underline{I}_p = 3\underline{I}_0$.

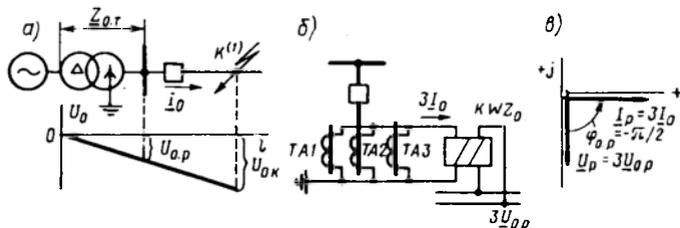


Рис. 6.7. Включение реле направления мощности на ток и напряжение нулевой последовательности

При $\underline{Z}_{0т} = jX_{0т}$ напряжение \underline{U}_p отстает по фазе от тока \underline{I}_p на угол $\pi/2$ (рис. 6.7, в), который определяется только сопротивлением $X_{0т}$ и не зависит от переходного сопротивления в точке повреждения. Исходя из векторной диаграммы желательно использовать реле направления мощности с углом $\alpha = \pi/2$. При этом вращающий момент

$$M_{np} = kU_p I_p \cos(\varphi_{0p} + \pi/2) = -kU_p I_p \sin \varphi_{0p}.$$

С учетом активного сопротивления линии угол φ_{0p} увеличивается до $\varphi_{0p} \approx 2\pi/3$. Поэтому в общем случае необходимо иметь реле с углом $\alpha = \pi/2 + \beta_0$ и вращающим моментом

$$M_{вp} = -kU_p I_p \sin(\varphi_{0p} + \beta_0),$$

где $\beta_0 \approx \pi/6$.

Достоинство рассматриваемой схемы включения реле направления мощности состоит в ее простоте и возможности осуществлять защиту без мертвой зоны. Реле срабатывает только при коротких замыканиях на землю, однако из-за погрешностей фильтров в нормальном режиме, и особенно при многофазных коротких замыканиях, на зажимах реле мощности появляются ток и напряжение небаланса и оно может сработать при любом направлении мощности к з. Этот недостаток схемы устраняется отстройкой измерительного органа тока от токов небаланса.

Включение реле на составляющие обратной последовательности. Составляющие обратной последовательности в полных напряжени-

ях и токах фаз содержатся при всех несимметричных коротких замыканиях. Они появляются также в первый момент после возникновения трехфазного короткого замыкания. В связи с этим реле направления мощности, включенное на составляющие обратной последовательности, кратковременно может действовать и при трехфазном коротком замыкании. Соотношение между током \underline{I}_2 и напряжением \underline{U}_2 обратной последовательности аналогично соотношению (6.9) между составляющими нулевой последовательности:

$$\underline{U}_2 = -\underline{I}_2 \underline{Z}_2, \quad (6.10)$$

где \underline{Z}_2 — результирующее сопротивление обратной последовательности, принимаемое обычно равным индуктивному сопротивлению:

$$\underline{Z}_2 = jX_2, \text{ Ом.}$$

Поэтому все изложенное о распределении \underline{U}_0 и построении векторной диаграммы напряжения \underline{U}_0 и тока \underline{I}_0 справедливо для напряжения \underline{U}_2 и тока \underline{I}_2 .

В связи с указанным реле направления мощности, включаемое на напряжение \underline{U}_2 и ток \underline{I}_2 , целесообразно было бы выбрать с характеристикой, близкой характеристике реле, включаемого на составляющие нулевой последовательности, с вращающим моментом

$$M_{\text{вр}} = -kU_p I_p \sin(\varphi_{2p} + \beta_2).$$

Однако в отличие от первичных фильтров напряжения и тока нулевой последовательности вторичные фильтры напряжения и тока обратной последовательности (см. § 1.7) в зависимости от характеристик и способов включения обуславливают различные фазные соотношения между напряжением \underline{U}_{2p} и током \underline{I}_{2p} . Поэтому в рассматриваемой схеме применяются смешанные реле с различными значениями угла α . Достоинством схемы является простота ее выполнения, принципиальная возможность четко срабатывать при любых коротких замыканиях, в том числе и при повреждении за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ . Это объясняется тем, что фазные соотношения между \underline{U}_2 и \underline{I}_2 не изменяются при переходе через трансформатор с любой схемой соединения его обмоток.

Схема не реагирует на токи симметричной нагрузки. Однако в связи с погрешностью фильтров реле может сработать при нормальной работе в любом направлении мощности. Неправильное действия защиты в этом случае исключается отстройкой тока срабатывания измерительного органа от тока небаланса на выходе фильтра обратной последовательности.

§ 6.3. СХЕМЫ И ОБЩАЯ ОЦЕНКА ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ И ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Общая оценка токовой направленной защиты. В общем случае токовая направленная защита представляет собой токовую ненаправленную защиту, снабженную органом направления мощности, поэтому в зависимости от назначения и предъявляемых к ней требований в основу схемы токовой направленной защиты можно положить любую из рассмотренных выше (см. § 5.7) схем токовой защиты.

В распределительных сетях напряжением до 35 кВ защита выполняется двухфазной и является основной защитой от всех коротких замыканий. В сетях с глухозаземленными нейтральными она используется в качестве защиты от многофазных коротких замыканий.

Схемы защиты могут быть на постоянном и переменном оперативном токе. При этом измерительные реле тока пофазно подводят оперативный ток к контактам реле направления мощности. Этим предотвращается неправильное срабатывание защиты, обусловленное поведением реле направления мощности, включенного на ток неповрежденной фазы.

Орган направления мощности может быть общим для всех или для части ступеней. Наличие органа направления мощности позволяет при выборе токов срабатывания учитывать только режимы, при которых мощность направлена от шин в линию, и реле направления мощности позволяют действовать защите на отключение. В этом случае чувствительность токовых отсечек повышается, если при отсутствии органа направления мощности расчетным условием выбора тока срабатывания является отстройка от максимального тока, проходящего по защищаемому участку при направлении мощности к.з. к шинам. Токовая направленная защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени обеспечивает селективное отключение поврежденного участка в радиальных сетях с несколькими источниками питания и в кольцевых сетях с одним источником питания. Однако из-за встречно-ступенчатого выбора выдержки времени третьей ступени в ряде случаев время отключения поврежденного участка, обычно расположенного вблизи источника питания, получается значительным. Это ограничивает применение третьей ступени в качестве отдельной защиты. Чувствительность защиты определяется не только измерительным реле тока, но и органом направления мощности. При этом защита отказывает в действии при трехфазном коротком замыкании в мертвой зоне. Теоретически возможны также ее неправильные действия при коротких замыканиях за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ . Поэтому в большинстве случаев токовая направленная защита в качестве основной применяется лишь в сетях напряжением 35 кВ и

ниже. В сетях с более высоким напряжением она используется в основном как резервная. Ее чувствительность определяется так же, как и чувствительность ненаправленной токовой защиты.

Общая оценка токовой направленной защиты нулевой последовательности. В сетях с глухозаземленными нейтральными наиболее частыми видами повреждения являются короткие замыкания на землю. Для их выявления и отключения могут быть использованы

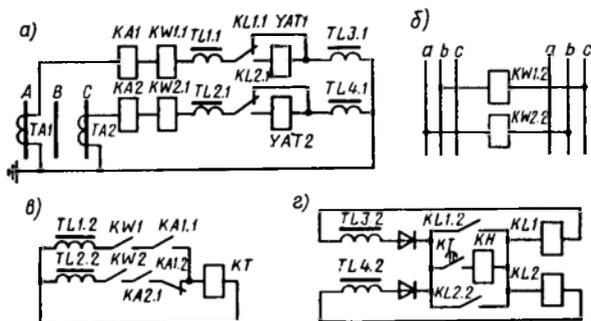


Рис. 6.8. Максимальная токовая направленная защита на переменном оперативном токе

ны имеющиеся на линиях токовые защиты от междуфазных к.з. Однако, как отмечалось выше (см. § 5.11), для этих целей желательно иметь отдельную токовую защиту нулевой последовательности, имеющую меньше выдержки времени и повышенную чувствительность, чем токовая защита с включением измерительных органов на полные токи фаз. Это полностью относится и к токовой направленной защите нулевой последовательности. Поэтому она широко используется как основная в сетях напряжением 110 кВ от коротких замыканий на землю.

Схемы токовой направленной защиты.

Схема максимальной токовой направленной защиты (третья ступень).

На рис. 6.8 приведены схемы цепей максимальной токовой направленной защиты на переменном оперативном токе с дешунтированием электромагнитов отключения выключателя. В защите используются промежуточные реле *KL1* и *KL2* типа РП-341, реле времени *KT* типа РВМ-12 и два реле направления мощности *KW1* и *KW2* типа РБМ, включенные по 90-градусной схеме (рис. 6.8, а, б). Измерительным органом являются реле тока *KA1* и *KA2* типа РТ-40. Пуск реле времени осуществляется пофазно последовательно соединенными контактами реле направления мощности и соответствующего реле тока. Схема управления реле времени выполнена таким образом, что при любых многофазных коротких замыканиях реле подключается только к одному из промежуточных насыщающихся трансформаторов тока *TL1* или *TL2* (рис. 6.8, в). По истечении установленной выдержки времени реле *KT* срабатывает, замыкая вторичные цепи промежуточных реле *KL1* и *KL2* (рис. 6.8, г). Контакты *KL1.1* и *KL2.1* дешунтируют электромагниты *YAT1* и *YAT2*, отключая выключатель. При на-

правлении мощности к.з. к шинам реле направления мощности не действует, поэтому реле времени, а следовательно, и промежуточные реле не срабатывают и защита не отключает выключателя.

Схема двухступенчатой направленной защиты с автоматической перестройкой параметров срабатывания третьей ступени. В настоящее время сельские распределительные сети все чаще выполняются секционированными с сетевым резервированием (рис. 6.9, а). В нормальном режиме все потребители энергии линии Л1 подключены к источнику питания

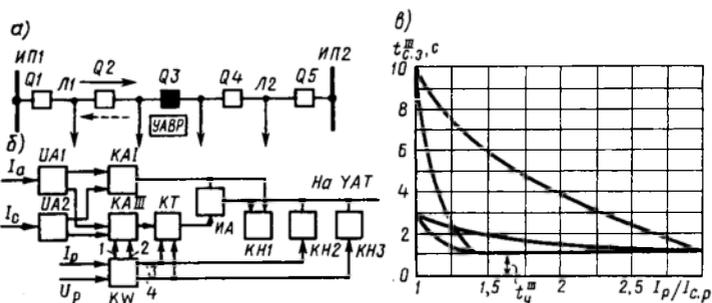


Рис. 6.9. Полупроводниковая максимальная токовая направленная защита секционированной сети с резервированием

ИП1, а потребители линии Л2 получают питание от источника ИП2. Первая линия секционирована выключателем Q2, а вторая — выключателем Q4. Выключатель Q3 оборудован устройством АВР (УАВР) и в нормальном режиме находится в отключенном состоянии. В режиме сетевого резервирования, когда выключатель Q3 включен, а выключатель одной из линий, например Q1, отключен, конфигурация сети изменяется, хотя сохраняется одностороннее питание. На линиях с односторонним питанием, как известно, требованиям селективности удовлетворяют токовые защиты, в том числе и максимальная токовая. Однако выбрать параметры максимальной токовой защиты, установленной на выключателе Q2 (Q4), так, чтобы она действовала селективно при работе сети по нормальной схеме и в случае сетевого резервирования, невозможно. Это объясняется тем, что удаленность выключателя и защиты от источника питания изменяется с изменением схемы электроснабжения.

Селективного действия защиты можно достичь, если автоматически изменять ее параметры с изменением режима работы сети. Направления тока через защиту в нормальном режиме (показано стрелкой) и в режиме сетевого резервирования (показано штриховой стрелкой) различны, поэтому для автоматической перестройки защиты можно использовать реле направления мощности. Их недостаток — наличие мертвой зоны. Более совершенна для такой сети

полупроводниковая токовая направленная защита двустороннего действия типа ЛТЗ [61].

Схема содержит (рис. 6.9, б) вторичные измерительные преобразователи тока $UA1$ и $UA2$; измерительные органы релейного действия: тока первой KAI и третьей $KAIII$ ступеней, направления мощности KW , выдержки времени KT ; выходной (исполнительный) элемент $ИА$ и элементы $KIII-KI3$ сигнализации о срабатывании первой и третьей (в зависимости от направления мощности) ступеней защиты.

В нормальном режиме работы орган направления мощности находится в положении после срабатывания и по своим выходным цепям 1 и 3 воздействует на измерительный орган $KAIII$, элемент выдержки времени KT и элемент сигнализации $KI2$. При этом третья ступень защиты подготовлена для срабатывания с уставками, соответствующими электроснабжению по нормальной схеме (выключатели $Q1$ и $Q2$ включены, выключатель $Q3$ отключен). Отключение выключателя $Q1$ сопровождается включением выключателя $Q3$ и изменением направления передаваемой мощности. В этом случае орган направления мощности находится в положении до срабатывания и его выходные цепи 2 и 4 подготавливают третью ступень защиты к срабатыванию с меньшими уставками, обеспечивающими селективность при сетевом резервировании. Орган направления мощности изменяет уставки третьей ступени до возникновения повреждения, поэтому защита не имеет мертвой зоны. Зона срабатывания органа направления мощности $-5\pi/12 < \varphi_p < -7\pi/12$.

Характеристики выдержки времени третьей ступени показаны на рис. 6.9, в. Уставки первой ступени не перестраиваются. Ее выдержка времени составляет $t'_{с.з} = 0,3$ с.

Глава 7

ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ ИЛИ ЗАЗЕМЛЕННЫМИ ЧЕРЕЗ ДУГОГАСЯЩИЕ РЕАКТОРЫ НЕЙТРАЛЯМИ

§ 7.1. УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ОДНОФАЗНОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ

Установившиеся токи замыканий на землю определяются режимом работы нейтрали электрических систем. В сетях с изолированной нейтралью установившиеся значения токов в точке повреждения при однофазных замыканиях обычно не превышают нескольких десятков ампер. Если нейтраль заземлить через дугогасящий реактор, то ток замыкания на землю при соответствующей настройке реактора можно значительно уменьшить. В связи с этим выполнение токовой защиты от однофазных замыканий на землю в таких сетях, реагирующей на установившиеся токи замыкания, вызывает определенные трудности. Это приводит к необходимости создания защит, действующих в зависимости от токов переходных процессов при замыканиях на землю, а также устройств, реагирующих на высшие гармонические, содержащиеся в токе замыкания на землю; используются также токовые направленные и другие защиты.

В сетях переменного тока при нормальной работе наряду с рабочими токами нагрузки по фазам проходят токи, обусловленные равномерно распределенными по длине проводов емкостями фаз относительно земли. Если не учитывать токи нагрузки, то напряжения во всех точках сети можно считать одинаковыми, так как емкостные токи малы и падением напряжения в проводах от этих токов можно пренебречь. При этом напряжения фаз относительно земли равны соответствующим фазным напряжениям \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C относительно нейтрали системы, а распределенные емкости фаз в

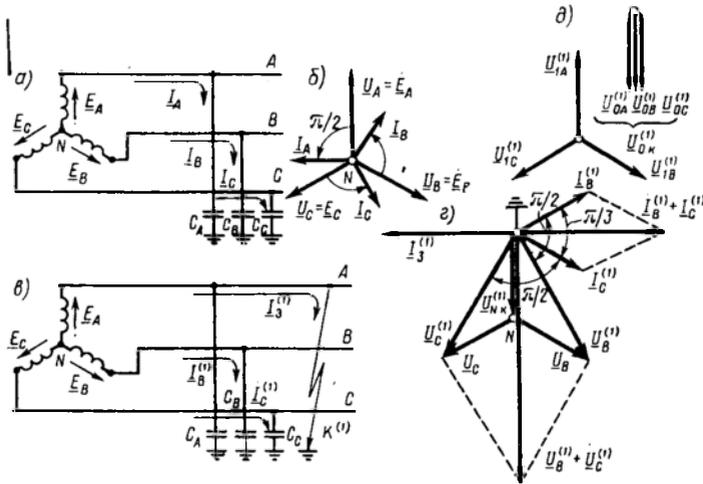


Рис. 7.1. Режимы сети с изолированной нейтралью и векторные диаграммы токов и напряжений

эквивалентной схеме можно заменить конденсаторами C_A , C_B , C_C (рис. 7.1, а).

Место присоединения конденсаторов на емкостные токи практически не влияет, так как индуктивное и активное сопротивления линии ничтожно малы по сравнению с сопротивлением емкости фазы относительно земли. В симметричной трехфазной сети $C_A = C_B = C_C = C$. В связи с отсутствием падения напряжения в проводах напряжения \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C равны соответствующим ЭДС источника питания, а их векторы образуют симметричную звезду фазных напряжений (рис. 7.1, б). В результате напряжение нейтрали системы N относительно земли равно нулю, а через сосредоточенные емкости проходят равные токи, опережающие по фазе соответствующие напряжения на углы $\pi/2$ и образующие симметричную систему токов:

$$\underline{I}_A = j\underline{U}_N / X_C = j\omega C \underline{U}_A; \quad \underline{I}_B = j\omega C \underline{U}_B; \quad \underline{I}_C = j\omega C \underline{U}_C.$$

При замыкании какой-либо фазы на землю в сетях с изолированными нейтральными напряжениями фаз относительно земли изменяются, оставаясь неизменными относительно нейтрали системы N . Так, при металлических замыканиях на землю, например, фазы A (рис. 7.1, в) она получает потенциал земли ($\underline{U}_A^{(1)}=0$). В связи с этим напряжения двух других фаз и нейтрали N относительно земли становятся напряжениями относительно замкнувшейся на землю фазы A (рис. 7.1, з):

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_B^{(1)}; \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C^{(1)}; \underline{U}_{NA} = \underline{U}_{N\kappa}^{(1)} = -\underline{U}_A.$$

Так как междуфазные напряжения остаются при этом неизменными, то напряжения неповрежденных фаз B и C относительно земли повышаются в $\sqrt{3}$ раз.

Систему двух векторов $\underline{U}_B^{(1)}$ и $\underline{U}_C^{(1)}$ можно разложить на составляющие прямой $\underline{U}_1^{(1)}$ и нулевой $\underline{U}_0^{(1)}$ последовательностей (рис. 7.1, д).

Действительно, при $\underline{U}_A^{(1)}=0$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1A}^{(1)} &= (a\underline{U}_B^{(1)} + a^2\underline{U}_C^{(1)})/3 = \underline{U}_A; \\ \underline{U}_{0A}^{(1)} &= \underline{U}_{0B}^{(1)} = \underline{U}_{0C}^{(1)} = \underline{U}_{0\kappa}^{(1)} = (\underline{U}_B^{(1)} + \underline{U}_C^{(1)})/3 = -\underline{U}_A; \\ \underline{U}_{2A}^{(1)} &= (a^2\underline{U}_B^{(1)} + a\underline{U}_C^{(1)})/3 = 0. \end{aligned}$$

Таким образом, при металлическом замыкании на землю в сети появляется напряжение нулевой последовательности $\underline{U}_{0\kappa}^{(1)}$, которое, как и напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{N\kappa}^{(1)}$, равно по абсолютному значению и противоположно по фазе напряжению, которое имеет поврежденная фаза относительно земли при нормальной работе (напряжению относительно нейтрали системы). Напряжение прямой последовательности равно напряжению фаз относительно земли при нормальной работе. Вследствие этого изменение напряжения фаз при замыкании на землю можно рассматривать как результат наложения напряжений нулевой последовательности $\underline{U}_{0\kappa}^{(1)}$ на напряжения фаз сети при ее нормальной работе.

Замыкания на землю обычно происходят через переходные активные сопротивления. При этом напряжение поврежденной фазы относительно земли не снижается до нуля, а напряжения неповрежденных фаз относительно земли становятся больше фазного, но меньше междуфазного. В связи с этим напряжение смещения нейтрали и напряжение нулевой последовательности получаются меньше фазного напряжения. Это уменьшение характеризуется коэффициентом полноты замыкания на землю: $\beta = \underline{U}_{0\kappa}^{(1)}/U_{\phi} \leq 1$.

Изменения фазных напряжений и появление напряжения нулевой последовательности можно использовать для выполнения защиты от замыкания на землю. Одновременно с изменением фазных напряжений изменяются и полные фазные токи. Токи неповрежденных фаз замыкаются через точку $K^{(1)}$ и поврежденную фазу, образуя ток $\underline{I}_3^{(1)}$ (рис. 7.1, в).

При металлическом замыкании на землю ток в емкости поврежденной фазы C_A отсутствует, так как напряжение поврежденной фазы относительно земли равно нулю. Токи $\underline{I}_B^{(1)}$, $\underline{I}_C^{(1)}$ неповрежденных фаз определяются напряжениями фаз B и C относительно земли:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_B^{(1)} &= j\omega C \underline{U}_B^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \underline{U}_B e^{j\pi/3}, \\ \underline{I}_C^{(1)} &= j\omega C \underline{U}_C^{(1)} = \sqrt{3}\omega C \underline{U}_C e^{j2\pi/3}. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

При условном положительном направлении токов $\underline{I}_B^{(1)}$, $\underline{I}_C^{(1)}$ и $\underline{I}_3^{(1)}$, показанном на рис. 7.1, $\underline{I}_3^{(1)} = -(\underline{I}_B^{(1)} + \underline{I}_C^{(1)})$ или с учетом (7.1) и соотношения $\underline{U}_B^{(1)} + \underline{U}_C^{(1)} = -3\underline{U}_A$

$$\underline{I}_3^{(1)} = -(j\omega C \underline{U}_B^{(1)} + j\omega C \underline{U}_C^{(1)}) = j3\omega C \underline{U}_A. \quad (7.2)$$

Полученный ток $\underline{I}_3^{(1)}$ опережает по фазе напряжение \underline{U}_A на угол $\pi/2$ и не зависит от расположения точки повреждения. Таким образом, при металлическом замыкании на землю фазы A токи через емкости неповрежденных фаз увеличиваются в $\sqrt{3}$ раз, а ток $\underline{I}_3^{(1)}$, проходящий через место повреждения в землю, равен утроенному значению емкостного тока фазы A при нормальной работе.

Для практических расчетов тока $\underline{I}_3^{(1)}$ (A) воздушных и кабельных линий пользуются упрощенными формулами

$$\underline{I}_3^{(1)} \approx U l / 350; \quad \underline{I}_3^{(1)} = U l / 10, \quad (7.3)$$

где U — линейное напряжение, кВ; l — длина электрически связанной сети, км.

Токи $\underline{I}_3^{(1)}$, $\underline{I}_B^{(1)}$ и $\underline{I}_C^{(1)}$ проходят в соответствующих фазах поврежденной линии на участке между источником питания и местом присоединения конденсаторов эквивалентной схемы (рис. 7.1, ν). Они представляют собой уравновешенную систему трех векторов, не содержащую токов нулевой последовательности ($\underline{I}_3^{(1)} + \underline{I}_B^{(1)} + \underline{I}_C^{(1)} = 0$) (рис. 7.2, δ). На участке же между точкой повреждения $\underline{K}^{(1)}$ и местом присоединения конденсаторов проходит только ток $\underline{I}_3^{(1)}$ по поврежденной фазе (см. рис. 7.1, ν). Поэтому здесь наряду с токами прямой и обратной последовательностей проходит ток нулевой последовательности $\underline{I}_0^{(1)} = \underline{I}_3^{(1)} / 3$ (рис. 7.2, ν). Пути замыкания токов нулевой последовательности показаны на рис. 7.2, a .

На рис. 7.2, z показана в однофазном исполнении схема сети, состоящей из трех линий $Л1-Л3$, подключенных к шинам генераторного напряжения. При замыкании на землю, например в точке $\underline{K}^{(1)}$, через место повреждения проходит ток $\underline{I}_3^{(1)}$, обусловленный не только емкостью поврежденной линии C_{01} , но и емкостями неповрежденных линий C_{02} и C_{03} , т. е.

$$\underline{I}_3^{(1)} = 3\underline{I}_{01}^{(1)} + 3\underline{I}_{02}^{(1)} + 3\underline{I}_{03}^{(1)}, \quad (7.4)$$

где $I_{01}^{(1)} = j\omega C_{01} \underline{U}_\Phi$; $I_{02}^{(1)} = j\omega C_{02} \underline{U}_\Phi$; $I_{03}^{(1)} = j\omega C_{03} \underline{U}_\Phi$.

При этом распределение токов нулевой последовательности в системе таково, что при условном направлении тока $\underline{I}_3^{(1)}$ к месту повреждения токи нулевой последовательности неповрежденных линий $3I_{02}^{(1)}$ и $3I_{03}^{(1)}$, проходя через емкости C_{02} и C_{03} , направляются к шинам подстанции и далее по поврежденной линии от шин к месту замыкания $K^{(1)}$. Ток $3I_{01}^{(1)}$, как и ток в случае одиночной линии, проходит по участку между местом повреждения и точкой

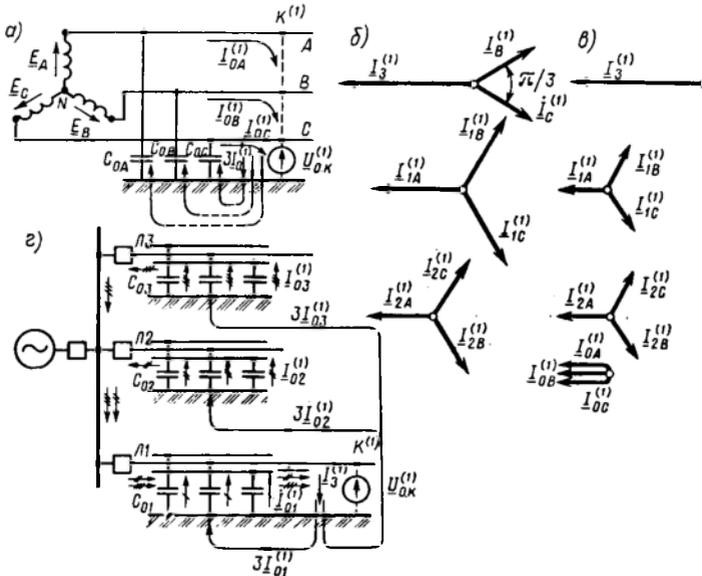


Рис. 7.2. Однофазное замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью и векторные диаграммы токов

присоединения конденсатора C_{01} . Таким образом, от шин по поврежденной линии направляется ток нулевой последовательности $I_{0эк}^{(1)}$, определяемый емкостью всех неповрежденных линий:

$$\underline{I}_{0эк}^{(1)} = \underline{I}_{02}^{(1)} + \underline{I}_{03}^{(1)} = j\omega \underline{U}_\Phi (C_{02} + C_{03}) = j\omega C_{0эк} \underline{U}_\Phi \quad (7.5)$$

В случае замыкания на землю на линии $L2$ или $L3$ по линии $L1$ (неповрежденной) к шинам проходит ток $3I_{01}^{(1)}$. Если $I_{0эк}^{(1)} > I_{01}^{(1)}$, то на линии $L1$ в качестве защиты от замыкания на землю можно использовать токовую защиту нулевой последовательности.

**§ 7.2. ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ,
РЕАГИРУЮЩИЕ НА ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ
НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА**

Устройство общей неселективной сигнализации от замыкания на землю. Замыкание на землю одной фазы в сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью не является аварией. Потребители, включенные на междуфазные напряжения, продолжают нормально работать. Это дает возможность выполнять защиту от замыкания на землю, действующей на сигнал. В сетях простой конфигурации допускается применение

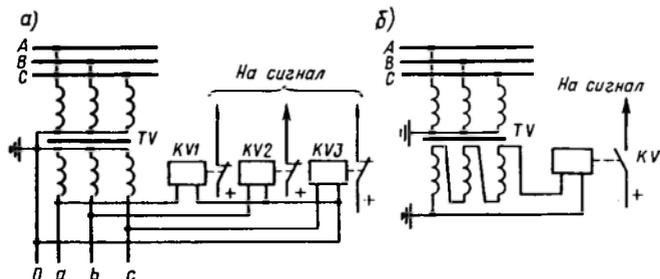


Рис. 7.3. Схемы устройства неселективной сигнализации при замыканиях на землю

только общего устройства неселективной сигнализации, контролирующего состояние изоляции в системе данного напряжения. Схема устройства состоит из трех минимальных реле напряжения, включенных на напряжения фаз относительно земли (рис. 7.3, а), или из одного максимального реле напряжения, включенного на напряжение нулевой последовательности (рис. 7.3, б). Устройство сигнализации обычно подключается к трансформаторам напряжения, установленным на шинах.

Токковая защита нулевой последовательности. Длительная работа сети при замыкании одной фазы на землю недопустима из-за возможности нарушения междуфазной изоляции в месте повреждения и перехода однофазного замыкания в многофазное. Возможны также случаи двойных замыканий на землю вследствие повышения в $\sqrt{3}$ раз напряжений неповрежденных фаз относительно земли. Поэтому в протяженных сетях сложной конфигурации, когда определение поврежденного участка затруднено, наряду с общим устройством неселективной сигнализации необходимо предусматривать селективную защиту на каждом присоединении. Обычно это токовая защита.

Вероятность повреждения междуфазной изоляции определяется не только продолжительностью прохождения тока через место за-

мыкания на землю, но и значением тока. Поэтому для предотвращения перехода однофазных замыканий в многофазные максимальный ток замыкания на землю в сетях напряжением 3—20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры, и во всех сетях 35 кВ должен быть не более $I_{з\max}^{(1)} < 10$ А; в сетях, не имеющих железобетонных и металлических опор при напряжении 3—6 кВ, — не более $I_{з\max}^{(1)} < 30$ А, при напряжении 10 кВ — не более $I_{з\max}^{(1)} < 20$ А и при напряжении 15—20 кВ — не более $I_{з\max}^{(1)} < 15$ А [3]. В протяженных и разветвленных сетях токи замыкания на землю могут быть больше указанных значений. В таких случаях для их компенсации применяются дугогасящие реакторы.

Таким образом, допустимые токи замыкания на землю обычно меньше рабочих токов защищаемого элемента, поэтому токовая защита от замыкания на землю, например линии ЛЛ (см. рис. 7.2, з), выполняется с включением реле на фильтр тока нулевой последовательности. Она приходит в действие благодаря прохождению по поврежденному участку тока нулевой последовательности $3I_{0\text{эк}}^{(1)}$, обусловленного емкостью всей электрически связанной сети $C_{0\text{эк}}$ без учета емкости C_{01} поврежденной линии [см. (7.5)]. Защита не должна срабатывать при повреждениях на других присоединениях сети, когда по защищаемой линии проходит ток $3I_{0л}^{(1)}$ ($3I_{01}^{(1)}$), обусловленный емкостью линии. При этом для обеспечения недействия защиты ее ток срабатывания выбирают по условию

$$I_{с.з} = k_{отс} 3I_{0л}^{(1)} \quad (7.6)$$

Коэффициент отстройки определяется броском емкостного тока в момент замыкания. На основании опытных данных для защит без выдержки времени $k_{отс} = 4...5$; для защит с выдержкой времени с учетом перемежающегося характера замыкания коэффициент $k_{отс} = 2,0...2,5$. Без выдержки времени выполняются защиты, действующие на сигнал, защиты линий торфоразработок и других сетей, находящихся в подобных условиях, где при замыкании на землю линии для безопасности должны отключаться без замедления. В таких сетях токи однофазного замыкания на землю обычно не превышают $I_3^{(1)} < 1,0...1,5$ А. При этом напряжение прикосновения ограничивается на допустимом уровне (не более 40 В) и однофазные замыкания на землю не представляют опасности для обслуживающего персонала.

Однако при возникновении второго замыкания на землю на другой фазе (двойного замыкания на землю) токи значительно возрастают, а напряжения прикосновения достигают недопустимых значений и могут явиться причиной несчастных случаев. Для уменьшения вероятности возникновения опасных двойных замыканий защита от замыканий на землю в рассматриваемых сетях выполняется с действием на отключение без выдержки времени. Чувствительность защиты характеризуется коэффициентом $k_{\eta} =$

$= 3I_{0\text{ЭК}}^{(1)}/I_{\text{с.з.}}$. Ток $I_{0\text{ЭК}}^{(1)}$ определяется по режиму с минимально возможным числом включенных линий. Чувствительность защиты считается достаточной, если для воздушных линий $k_{\text{ч}} \geq 1,5$, а для кабельных $k_{\text{ч}} \geq 1,25$.

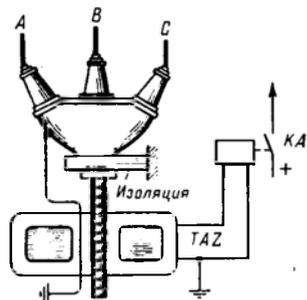


Рис. 7.4. Защита от замыканий на землю с кабельным ТНП

Для выполнения защиты в качестве фильтра тока нулевой последовательности обычно используется трансформатор тока нулевой последовательности (ТНП) ТАЗ (рис. 7.4). При замыкании в сети на землю токи повреждения могут замыкаться как через землю, так и по проводящей оболочке кабеля, в том числе и неповрежденного, что может вызвать неправильное действие защиты. Поэтому воронку и кабель на участке от ТНП до воронки изолируют от земли, а заземляющий провод присоединяют к воронке кабеля и пропускают через отверстие магнитопровода ТНП в направ-

лении кабеля. При таком исполнении цепей защиты токи, проходящие по броне и проводящей оболочке кабеля, компенсируются токами, возвращающимися по заземляющему проводу.

Чувствительность защиты характеризуется минимальным первичным током замыкания на землю. При использовании электромагнитного реле с трансформаторами тока нулевой последовательности можно выполнить защиту, действующую при минимальном первичном токе замыкания на землю $I_{\text{з}}^{(1)} = 5 \text{ А}$, поэтому эту защиту нельзя применять, например, на линиях торфоразработок.

§ 7.3. НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ, РЕАГИРУЮЩАЯ НА УСТАНОВИВШИЕСЯ ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ

Если в установившемся режиме собственный емкостный ток линии $I_{0\text{д}}^{(1)}$ в сетях с изолированной нейтралью соизмерим с полным током замыкания на землю, то токовую защиту, реагирующую на установившееся значение емкостного тока, осуществить нельзя. В таких случаях применяется направленная защита нулевой последовательности или устройство сигнализации, контролирующее не только значение, но и направление тока замыкания на землю.

Из анализа векторных диаграмм напряжения и тока нулевой последовательности (см. рис. 7.1) следует, что максимальной чувствительностью обладает реле мощности с внутренним углом $\alpha = \pi/2$. Поэтому для выполнения защиты требуется синусное реле, подключаемое к фильтрам напряжения и тока нулевой последовательности. Защита не имеет измерительного органа тока, поэтому для исключения неправильного ее срабатывания реле направления мощности отстраивается от мощности небаланса, обусловленной погрешно-

стями фильтров. Такую защиту можно применять и в сетях с нейтралями, заземленными через дугогасящие реакторы; тогда для ее действия при возникновении замыкания на землю необходимо автоматически отключать дугогасящие реакторы или изменять на них отклонения так, чтобы емкостный ток, проходящий по поврежденной линии, оказался достаточным для срабатывания защиты. Отключать дугогасящие реакторы не требуется, если для действия

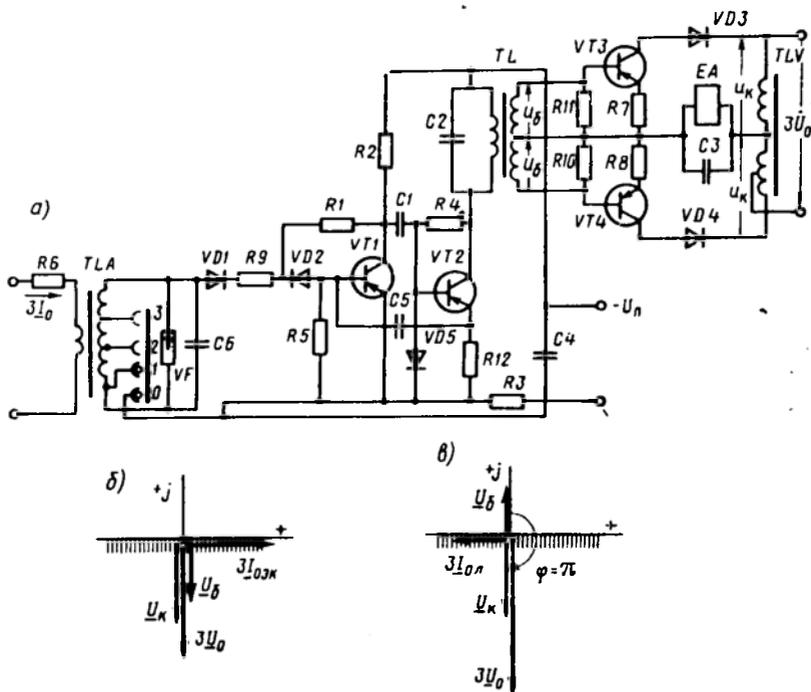


Рис. 7.5. Схема направленной защиты от замыкания на землю типа ЗЗП-1 и векторные диаграммы

защиты используется не емкостный ток, а активная составляющая тока замыкания на землю, обусловленная потерями в дугогасящем реакторе и активной проводимостью фаз сети. Необходимо отметить, что так как ток компенсации и емкостный ток в поврежденной линии имеют противоположные направления, то в перекомпенсированной сети направление тока в поврежденной и неповрежденной линиях одинаковое, поэтому для действия направленной защиты можно использовать только активный ток, который не превышает нескольких процентов от полного тока реактора. Поэтому реле направления мощности должны обладать высокой чув-

ствительностью по углу, а фильтры нулевой последовательности — иметь малые погрешности.

В схемах можно использовать индукционные реле направления мощности высокой чувствительности. Однако такие реле потребляют большую мощность. Защита же в целом, как показывает опыт эксплуатации, работает надежно.

Промышленность выпускает более совершенную направленную защиту нулевой последовательности от замыкания на землю типа ЗЗП-1 на полупроводниковой элементарной базе. Защита предназначена для селективного отключения защищаемого присоединения при однофазных замыканиях на землю в сетях торфоразработок, карьеров, шахтных сетях и тяговых сетях электрифицированного транспорта напряжением 2—10 кВ с током замыкания на землю от 0,2 до 20 А. Защита имеет малую потребляемую мощность и реагирует на ток замыкания, составляющий $I_3^{(1)} = 0,07 \dots 2$ А. Она состоит (рис. 7.5, а) из вторичного измерительного преобразователя тока нулевой последовательности в виде промежуточного трансформатора T_{LA} , нагруженного конденсатором C_6 (называемого согласующим устройством), двухкаскадного избирательного усилителя переменного тока на транзисторах $VT1$ и $VT2$, схемы сравнения фаз на транзисторах $VT3$ и $VT4$ двух электрических величин, пропорциональных току $3I_0$ и напряжению $3U_0$ нулевой последовательности, и реагирующего элемента EA .

Согласующее устройство преобразует ток $3I_0$ в напряжение (на конденсаторе C_6), сдвинутое по фазе на угол $\pi/2$ относительно тока нулевой последовательности, позволяет изменять ток срабатывания защиты (изменением числа витков обмотки трансформатора) и обеспечивает термическую стойкость защиты при двойных замыканиях на землю (разрядник VF).

Двухкаскадный усилитель переменного тока выделяет и усиливает составляющую промышленной частоты выходного напряжения согласующего устройства. Для этой цели на выходе усилителя включен резонансный контур $C2 - TL$ с частотой $f_0 = 50$ Гц.

Схема сравнения осуществляет сравнение фаз двух синусоидальных величин: напряжения U_6 вторичной обмотки трансформатора TL , пропорционального току нулевой последовательности $3I_0$ и смещенного по фазе относительно него на угол $\pi/2$, и напряжения U_k автотрансформатора TLV , пропорционального напряжению нулевой последовательности $3U_0$. Сравнивается время совпадения t_0 их мгновенных значений по знаку с установленным временем t_y . Реагирующий элемент EA срабатывает при $t_0 \geq t_y$.

Из векторных диаграмм тока $I_0^{(1)}$ и напряжения $U_0^{(1)}$ (см. рис. 7.1) следует, что при замыкании на защищаемой линии, когда через защиту к точке замыкания проходит ток $3I_{0ж}^{(1)}$, обусловленный емкостями неповрежденных линий, сравниваемые напряжения U_6 и U_k совпадают по фазе (рис. 7.5, б). На неповрежденной линии ток $3I_{0л}^{(1)}$, обусловленный собственной емкостью линии, направлен к шинам, а сравниваемые с защитой напряжения смещены по фазе на угол π (рис. 7.5, в). Из этого следует, что защита срабатывает, имея максимальную чувствительность, если угол φ сдвига фаз между U_6 и U_k равен нулю, и не действует при $\varphi = \pi$. Таким образом, зона срабатывания определяется углом сдвига фаз $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$. На рис. 7.5, б, в она ограничена линией нулевой чувствительности.

Схема сравнения является двухполупериодной. На ее выходе включен реагирующий элемент EA в виде поляризованного реле. Ток в обмотке реле в один из полупериодов определяется состоянием транзистора $VT3$ и диода $VD3$, а в другой полупериод — состоянием транзистора $VT4$ и диода $VD4$. Для прохождения тока необходимо, чтобы в первом случае одновременно были открыты $VT3$ и $VD3$, а во втором — $VT4$ и $VD4$. Состояние транзисторов и диодов зависит от полярностей мгновенных напряжений u_6 и u_k . Они открыты, если эти напряжения имеют одинаковую полярность. При совпадающих по фазе \underline{U}_6 и \underline{U}_k (рис. 7.5, б) в течение одного из полупериодов открыты $VT3$ и $VD3$, а в течение другого — $VT4$ и $VD4$. При этом ток в обмотке реагирующего элемента EA максимален. По мере увеличения угла сдвига фаз между \underline{U}_6 и \underline{U}_k время совместного открытого состояния соответствующих транзистора и диода в каждом полупериоде сокращается, поэтому среднее значение тока в обмотке EA уменьшается. Для получения указанной выше зоны срабатывания ток срабатывания реагирующего элемента выбран равным среднему значению тока при $\varphi = \pi/2$.

§ 7.4. ТОКОВАЯ ЗАЩИТА, РЕАГИРУЮЩАЯ НА ВЫСШИЕ ГАРМОНИЧЕСКИЕ В УСТАНОВИВШЕМСЯ ТОКЕ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Высшие гармонические, содержащиеся в токе и при нормальном режиме, обусловлены несинусоидальным характером кривых ЭДС генераторов и токами намагничивания силовых трансформаторов. При этом основным источником высших гармонических являются силовые трансформаторы. В зависимости от условий работы, характера нагрузки и конфигурации сети порядок высших гармонических и их амплитуда изменяются.

При возникновении однофазного замыкания на землю содержание высших гармонических в сети резко увеличивается, причем содержание высших гармонических в токе нулевой последовательности поврежденной линии во много раз больше, чем в токах нулевой последовательности неповрежденных линий. Такое положение наблюдается как в сети с изолированной, так и в сети с заземленной через дугогасящий реактор нейтралью при любой степени компенсации емкостных токов. Дугогасящий реактор только увеличивает содержание высших гармонических в токе нулевой последовательности поврежденной линии.

Принципиально можно выполнить устройство сигнализации, реагирующее либо на определенную гармоническую, либо на содержание всех высших гармонических в токе нулевой последовательности, что более целесообразно. Разработаны устройства, например УСЗ 2/2, УСЗ-3М и УСЗ-3, предназначенные для селективной сигнализации замыканий на землю в кабельных сетях 6—10 кВ с заземленной через дугогасящий реактор нейтралью. Они реагируют на содержание всех высших гармонических в установившемся токе нулевой последовательности. Показанная в упрощенном виде принципиальная схема устройства УСЗ 2/2 (рис. 7.6) содержит согласующий трансформатор TL , измерительную, логическую и исполни-

гельную части. Для защиты устройства от пиковых напряжений при двойных замыканиях на землю установлен разрядник VF .

Согласующий трансформатор TL служит для согласования работы устройства с различными типами ТНП.

Измерительная часть определяет наличие высших гармонических в установившемся токе нулевой последовательности. Она состоит из фильтра LC , настроенного на резонансную частоту, близкую к 50 Гц, конденсатора $C1$, переменного резистора $R1$ и выпрямителя VS . Конденсатор $C1$ отфильтровывает высшие гармонические частотой 2 кГц и выше. Таким образом, выпрямленное напряжение на выходе измерительной части оказывается пропорциональ-

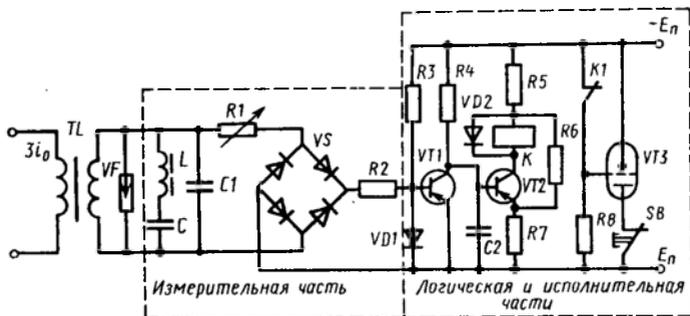


Рис. 7.6. Схема устройства селективной сигнализации при замыкании на землю в кабельных сетях типа УСЗ 2/2

ным содержащимся в токе нулевой последовательности всем высшим гармоническим частотой более 50 Гц, но менее 2 кГц. Это напряжение подается на вход логической части (базу $VT1$). Переменный резистор $R1$ служит для дискретного регулирования тока срабатывания: 25, 50, 100 и 250 А.

Логическая и исполнительная части содержат транзисторы $VT1$, $VT2$, диоды $VD1$, $VD2$, тиратрон с холодным катодом $VT3$, конденсатор $C2$, выходное реле K и резисторы $R2—R8$. В исходном состоянии при отсутствии повреждения напряжения на выходе измерительной части тоже отсутствует. При этом транзистор $VT1$ открыт ($R3 > R4$), а диод $VD1$ закрыт. Заряд конденсатора $C2$ мал, он определяется падением напряжения на открытом транзисторе $VT1$. Транзистор $VT2$ закрыт, так как потенциал его базы в связи с открытым состоянием транзистора $VT1$ оказывается более положительным, нежели потенциал эмиттера. В этом случае реле K обесточено, его контакт $K1$ замкнут, на сетку тиратрона $VT3$ подается отрицательный потенциал и тиратрон не зажжен. При возникновении повреждения на защищаемом участке на выходе измерительного элемента и соответственно между эмиттером и базой транзистора $VT1$ появляется выпрямленное напряжение, открывающее диод $VD1$. Потенциалы эмиттера и базы транзистора $VT1$ оказываются одинаковыми и транзистор закрывается. Конденсатор $C2$ начинает заряжаться. Через некоторое время напряжение на конденсаторе, а следовательно, и на базе транзистора $VT2$ достигнет значения, равного падению напряжения на резисторе $R7$. Транзистор открывается, реле K срабатывает, контакт $K1$ размыкается и тиратрон $VT3$ зажигается. Таким образом, с помощью конденсатора $C2$ достигается задержка на срабатывание около 30—50 мс, что вполне достаточно для правильного действия защиты при перемежающихся замыканиях и отстройки ее от переходных процессов.

В самом деле, если транзистор $VT1$ открывается до истечения выдержки времени, создаваемой зарядом конденсатора $C2$, то конденсатор быстро разря-

дится через открытый транзистор $VT1$, а транзистор $VT2$ или совсем не открывается, или ток его коллектора не успеет достигнуть значения, равного току срабатывания реле, т. е. устройство срабатывает только при замыканиях на землю в защищаемой зоне, если оно продолжается не менее 30—50 мс. При устранении повреждения транзисторы $VT1$, $VT2$ и реле K возвращаются в исходное состояние, а тиристор $VT3$ продолжает гореть до размыкания его цепи кнопочным выключателем SB . При внешних повреждениях уровень высших гармонических и пропорциональное им выпрямленное напряжение оказываются недостаточными для открытия диода $VD1$ и устройство не действует.

Несколько иную схему имеют устройства УСЗ-3М и УСЗ-3. Конструкция устройства УСЗ-3М предусматривает возможность его применения в качестве стационарного и переносного. Устройство УСЗ-3 применяется совместно с токоизмерительными клещами.

§ 7.5. ЗАЩИТЫ, ОСНОВАННЫЕ НА КОНТРОЛЕ ТОКА И НАЧАЛЬНОГО ЗНАКА МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Для ограничения разрушительного действия дуги при однофазных замыканиях на землю в сетях напряжением 6—35 кВ стремятся к полной компенсации тока замыкания на землю током дугогасящего реактора. Однако при этом ток, проходящий в начале поврежденной линии, т. е. ток в защите, может быть недостаточным для ее срабатывания. В связи с этим в некоторых случаях для действия защиты осуществляется кратковременное (на время, необходимое для срабатывания защиты) нарушение компенсации. Недостатком искусственного нарушения компенсации является увеличение в момент отключения дугогасящего реактора тока, что может привести к переходу однофазного повреждения в многофазное.

Более удачно выполнение защиты, способной селективно работать от токов переходного процесса при замыканиях на землю в сетях с полной компенсацией установившегося емкостного тока. Возникновение токов переходного процесса при однофазном замыкании на землю связано с разрядом емкости поврежденной фазы и дополнительным зарядом емкостей неповрежденных фаз.

В нормальном режиме провода линии находятся под фазным напряжением относительно земли, а значение и знак дополнительных зарядных токов зависят от момента времени возникновения замыкания на землю.

Пробой изоляции и возникновение повреждения на землю, например фазы A , обычно происходят в момент, когда мгновенное значение фазного напряжения близко к максимальному значению ($U_A \approx U_m$). При этом мгновенные значения напряжений двух других фаз $U_B = U_C \approx 0,5U_m$. Поэтому в первый момент при замыкании на землю происходят разряд емкости фазы A , сопровождающийся снижением ее напряжения относительно земли до нуля, и дополнительный заряд емкостей неповрежденных фаз до линейного напряжения. Токи разряда и заряда имеют одинаковое направление, складываясь в месте замыкания, образуя утроенный ток нулевой последовательности переходного процесса $3i_{0n}^{(1)}$ (рис. 7.7, a). В сложной разветвленной сети переходный процесс протекает следующим образом: ток в месте повреждения образуется от наложения друг на друга токов переходных процессов в неповрежденных линиях, являющихся самостоятельными контурами.

При повреждении вблизи шин токи переходных процессов в неповрежденных линиях имеют обычно быстрозатухающий колебательный характер. По мере удаления места замыкания на землю от шин электростанции или подстанции переходный процесс в связи с возрастанием активных сопротивлений контуров приближается к апериодическому. Токи разряда и заряда определяют переходный ток в месте замыкания (в поврежденной линии). Примерный характер его изменения во времени показан на рис. 7.7, б.

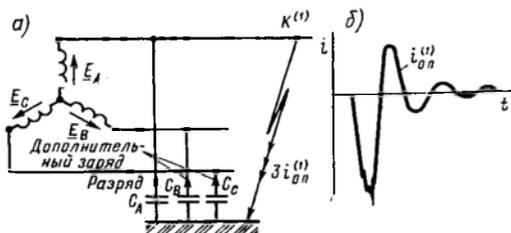


Рис. 7.7. Переходный процесс при замыкании на землю в сети с изолированной нейтралью

Примерный характер его изменения во времени показан на рис. 7.7, б. Частота ω_n переходного тока повреждения составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч герц (200—3000 Гц), а весь процесс затухает в течение нескольких миллисекунд.

Приближенно можно считать, что максимальные мгновенные значения токов в переходном $I_{0n \max}^{(1)}$ и установившемся $I_{0 \max}^{(1)}$ режимах относятся, как их частоты ω_n и $\omega_0 = 50$ Гц, т. е. $I_{0n \max}^{(1)} =$

$= k\omega_n I_{0 \max}^{(1)} / \omega_0$, т. е. переходные токи могут в десятки раз превышать токи установившегося режима.

В поврежденной линии амплитуда первой полуволны переходного тока получается наибольшей.

В компенсированных сетях характер изменения переходных токов не изменяется. Это объясняется тем, что скорость нарастания переходного индуктивного тока, обусловленного дугогасящим реактором, меньше скорости нарастания переходного емкостного тока. Таким образом, сеть во время переходного процесса оказывается некомпенсированной. Рассмотренные соотношения дают возможность выполнять токовую защиту нулевой последовательности в компенсированных сетях, действующую в зависимости от тока переходного процесса.

Селективное действие защиты обеспечивается благодаря отстройке ее тока срабатывания от переходных значений емкостных токов $I_{0 \text{ л.п.}}^{(1)}$, обусловленных емкостью защищаемой линии:

$$I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} 3I_{0 \text{ л.п.}}^{(1)}, \quad (7.7)$$

где $k_{\text{отс}} = 2,0 \dots 2,5$.

Для выполнения защиты необходимо использовать реле, способное зафиксировать кратковременные импульсы переходного тока, например тириatronное реле. Имеются также схемы с использованием электромагнитных реле тока [13]. В сетях, где переходный ток повреждения соизмерим с переходным током неповрежденной линии, выполнить токовую защиту необходимой чувствительности затруднительно. Чувствительность защиты можно повысить, применив направленные реле или скомпенсировав переходный емкостный ток неповрежденной линии [13].

Основной недостаток защиты, работающей от переходных токов повреждения, состоит в том, что она не реагирует на установившиеся

ся токи повреждения. В связи с этим исключается возможность повторного срабатывания реле, возвращенного в начальное положение при проверке наличия на линии, на которой срабатывает защита устойчивого повреждения. Кроме того, имеются затруднения в расчете токов переходного процесса, которые зависят от момента возникновения повреждения, переходного сопротивления, в частности сопротивления дуги.

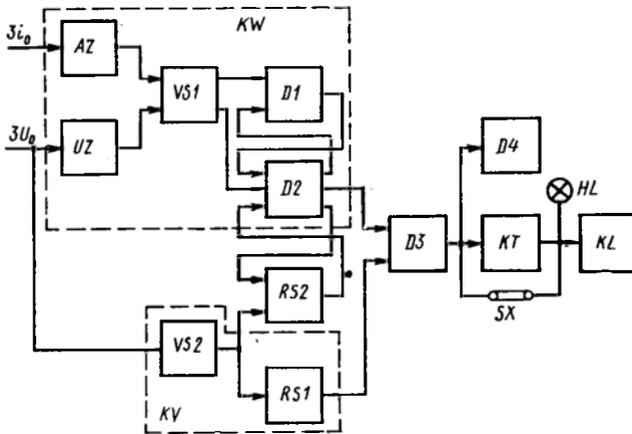


Рис. 7.8. Функциональная схема защиты от замыкания на землю, реагирующей на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса

Указанного недостатка не имеет защита, реагирующая на начальный знак мощности нулевой последовательности переходного процесса. В переходном процессе возникшее перераспределение фазных напряжений в точке замыкания распространяется с конечной скоростью по линии к шинам в виде электромагнитных волн. Направление распространения волны определяется знаком ее мгновенной мощности $p=ui$, где u , i — напряжение и ток волны. Таким образом, в начале поврежденной линии мгновенная мощность имеет отрицательный знак, а в начале неповрежденной линии — положительный знак. Это справедливо для сетей любой сложности.

Исследования показывают [62], что в начальной стадии переходного процесса результирующая мощность нулевой последовательности и мощность электромагнитной волны имеют одинаковые знаки. Это позволило выполнить импульсную направленную защиту нулевой последовательности типа ИЗС, подключаемую к стандартным измерительным трансформаторам тока и трансформаторам напряжения. Структурная схема защиты показана на рис. 7.8. Устройство выполнено на полупроводниковой элементной базе. Основным органом защиты является импульсное реле направления мощ-

ности KW , фиксирующее начальный знак мгновенной мощности переходного процесса при замыканиях на землю.

Фиксация осуществляется через 15—20 мкс от начала возникновения повреждения. Этим исключается возможное влияние начальных искажений на работу защиты, вызванных переходными процессами в фильтре напряжения нулевой последовательности. Реле KW содержит: Т-образные RC фильтры AZ и VZ цепей тока и напряжения, подавляющие величины промышленной частоты и пропускающие гармонические составляющие частотой порядка 1 кГц и выше без затухания; кольцевой фазочувствительный выпрямитель $VS1$, определяющий знак мощности; одновибратор $D2$, срабатывающий при полярности импульса на выходе $VS1$, соответствующей повреждению в зоне защиты, и одновибратор $D1$, срабатывающий при противоположной полярности импульса. Одновибраторы $D1$ и $D2$ взаимно блокируют друг друга, чем обеспечивается стабильная фиксация первого знака мощности, причем одновибратор $D1$ более высокой чувствительности, чем $D2$.

Переходные процессы возникают также и при отсутствии замыканий на землю, например при постановке линии под напряжение. Для того чтобы защита приходила в действие только при замыканиях на землю, в ее схему включено максимальное реле напряжения KV , реагирующее на напряжение нулевой последовательности $3U_0$ промышленной частоты. В состав реле входят выпрямитель $VS2$ и триггер $RS1$. Элемент $D3$ выполняет логическую операцию И при срабатывании реле KW и KV . Для правильного действия защиты в течение всего времени существования повреждения необходимо зафиксировать первоначальный знак мощности переходного процесса. Для этой цели служит триггер $RS2$, на выходе которого появляется сигнал с задержкой, позволяющей реле KW зафиксировать знак мощности. В выходных цепях защиты лампа HL , счетчик $D4$, реле KL и реле KT позволяют при повреждении в защищаемой зоне осуществить световую сигнализацию, подсчет числа устойчивых и неустойчивых замыканий, действовать на отключение поврежденной линии без выдержки времени или с выдержкой времени около 1,5 с.

§ 7.6. ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

Опыт эксплуатации измерительных трансформаторов напряжения (ТН), используемых для подключения к ним общей сигнализации от замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью, свидетельствует об их частой повреждаемости, особенно в сельской местности. Имеются сети, которые из-за регулярных повреждений ТН длительно эксплуатируются без устройства общей сигнализации от замыканий на землю. По данным ряда работ, например [63], основной причиной повреждения ТН следует считать феррорезонансные явления, вследствие которых через обмотки высшего напряжения трансформатора проходят токи, многократно превышающие номинальные значения.

Возможны различные причины появления феррорезонансных процессов. Одна из них — повышение напряжения любой из фаз источника питания. При этом в сети самопроизвольно развиваются колебания на основной и высших гармонических. Этот процесс сопровождается, как правило, перенапряжениями, которые могут достигать четырехкратного фазного напряжения. Последствием таких перенапряжений являются нарушения изоляции, которые

приводят к однофазным замыканиям на землю и к многофазным коротким замыканиям. Вторая причина феррорезонансных процессов — переходные процессы, вызванные коммутациями в схеме электроснабжения, например включение секции шин, отключение замыкания на землю и др. В этих случаях могут возникать феррорезонансные процессы не только на основной и высших гармонических, но и на низших гармонических — субгармонических.

Согласно ряду работ, например [64], значительная доля повреждений ТН связана с однофазными замыканиями на землю. Металлическое однофазное замыкание и замыкание через устойчивую дугу по воздействию на ТН незначительно различаются между собой. Токи в обмотках высшего напряжения трансформатора в этих режимах не превышают допустимых и не опасны. Опасные токи могут возникнуть при отключении поврежденного присоединения или при самопогасании дуги и последующем появлении феррорезонансных колебаний, обусловленных колебательным разрядом емкостей неповрежденных фаз через обмотки ТН. Наиболее опасны для ТН длительные однофазные замыкания на землю через перемежающуюся дугу.

Мероприятия по снижению повреждаемости ТН можно разделить на несколько групп: включение нагрузочных резисторов в цепь вторичной обмотки ТН, соединенной в разомкнутый треугольник; включение резистора в нейтраль обмоток высшего напряжения; применение разрядников; применение специальных демпфирующих устройств на стороне высшего напряжения ТН; компенсация емкостных токов в сети с помощью дугающих реакторов и др.

Наиболее прост и доступен способ, предусматривающий включение в цепь вторичной обмотки ТН, соединенной в разомкнутый треугольник нагрузочного резистора. Защитное действие резистора заключается в создании потери энергии свободных колебаний составляющих нулевой последовательности. Поэтому сопротивление резистора должно быть небольшим. Однако при этом ТН дополнительно нагружается токами и перегревается. Рекомендованные

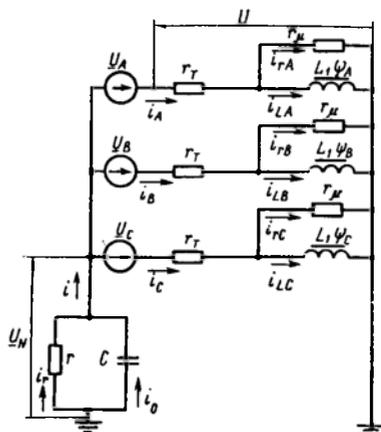


Рис. 7.9. Схема замещения сети с трансформатором напряжения при замыканиях на землю:

U_A, U_B, U_C — фазные напряжения источника питания; r_T — активные сопротивления обмотки высшего напряжения ТН; L_1 — нелинейная индуктивность, соответствующая кривой намагничивания ТН; r — активные сопротивления, соответствующие потерям в стали ТН; r — эквивалентное активное сопротивление, соответствующее резистору в цепи обмотки ТН, соединенной в разомкнутый треугольник; C — эквивалентная емкость сети относительно земли

сопротивления резисторов $r=25...12,5$ Ом не обоснованы и, как показывает практика, не обеспечивают защиту ТН при феррорезонансных процессах.

Так как ТН является нелинейным элементом, задачу анализа переходных процессов в нем целесообразно решать без применения метода симметричных составляющих. В таком случае должна быть составлена одна схема замещения, удовлетворяющая условиям прохождения токов всех последовательностей. Этим условиям соответствует схема, изображенная на рис. 7.9.

При составлении схемы приняты следующие допущения: источник питания считается источником неограниченной мощности. При таком условии наличие междуфазных емкостей сети и емкости фаз на землю не влияет на прохождения токов прямой и обратной последовательностей в ТН;

не учитываются продольные сопротивления сети и реактивности рассеяния ТН, так как они малы по сравнению с сопротивлениями поперечных емкостей сети и ветвей намагничивания трансформатора;

не учитываются токи во вторичной обмотке ТН, соединенной в звезду,

Схеме замещения соответствует следующая система уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\Psi_A}{dt} &= \frac{r_\mu}{r_\tau + r_\mu} (\underline{U}_A - \underline{U}_N - r_\tau i_{LA}), \\ \frac{d\Psi_B}{dt} &= \frac{r_\mu}{r_\tau + r_\mu} (\underline{U}_B - \underline{U}_N - r_\tau i_{LB}), \\ \frac{d\Psi_C}{dt} &= \frac{r_\mu}{r_\tau + r_\mu} (\underline{U}_C - \underline{U}_N - r_\tau i_{LC}), \\ \frac{d\underline{U}_N}{dt} &= \frac{1}{C} \left[\frac{r_\mu}{r_\tau + r_\mu} (i_{LA} + i_{LB} + i_{LC}) - \left(1 - \frac{2r}{r + r_\tau + r_\mu} \right) \underline{U}_N \right], \\ i_{LA} &= \sum_{n=1}^m a_n \Psi_A^{2n-1}, \quad i_{LB} = \sum_{n=1}^m a_n \Psi_B^{2n-1}, \quad i_{LC} = \sum_{n=1}^m a_n \Psi_C^{2n-1}, \end{aligned} \right\} (7.8)$$

где a_n — коэффициент полинома, аппроксимирующего кривую намагничивания; $n=1, 2, \dots, m$.

В результате решения уравнений (7.8) для трансформаторов НТМИ-10-66 определены напряжение нейтрали \underline{U}_N , восстанавливающееся напряжение поврежденной фазы U и ток в обмотке высшего напряжения $i_{вн}$ при различных значениях r и $C(I_3^{(1)})$. Установлено, что при увеличении тока замыкания на землю $I_3^{(1)}$ продолжительность переходного процесса и ток $i_{вн}$ возрастают. Сопротивление резистора r влияет на абсолютные значения напряжения U_N и скорость его изменения. При уменьшении r производная dU_N/dt и ток $i_{вн}$ также уменьшаются. На рис. 7.10 показан результат расчета при $r=25$ Ом и токе замыкания $I_3^{(1)}=5$ А. Напряжение нейтрали U_N совершает затухающие колебания и проходит через нулевое значение примерно через 0,015 с с момента возникновения переходного процесса. При этом производная dU_N/dt имеет максимальное значение, ему соответствует максимальный ток $i_{вн}$, превышающий номинальное значение.

Из анализа следует, что эффективность защитного действия резистора r можно повысить путем уменьшения его сопротивления и включения резистора в момент возникновения феррорезонанса и

только на время его существования. Оптимально сопротивление $r=5$ Ом.

Одна из возможных схем защиты ТН изображена на рис. 7.11 Измерительным органом является электрическая цепь, состоящая из нелинейного реактора LR и двух резисторов $R1, R2$ и подключаемая к обмоткам ТН, соединенным в разомкнутый треугольник.

В нормальном режиме работы сети напряжение $3U_0$ на входе измерительного органа практически равно нулю, схема находится в исходном состоянии, транзисторы $VT1, VT2$ и тиристоры $VDT1$ и $VDT2$ закрыты. В режиме однофазного металлического замыкания на землю напряжение $3U_0$ изменяется практически синусоидально с номинальной частотой сети. При этом падение напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ недостаточно для создания необходимого тока управления и открытия транзисторов. При наличии в напря-

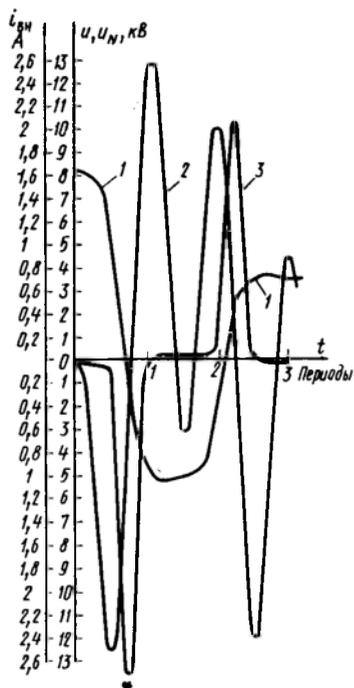


Рис. 7.10. Переходный процесс в НТМИ-10-66 после исчезновения замыкания на землю:

1 — напряжение нейтрали; 2 — напряжение поврежденной фазы; 3 — ток в обмотке высшего напряжения НТМИ

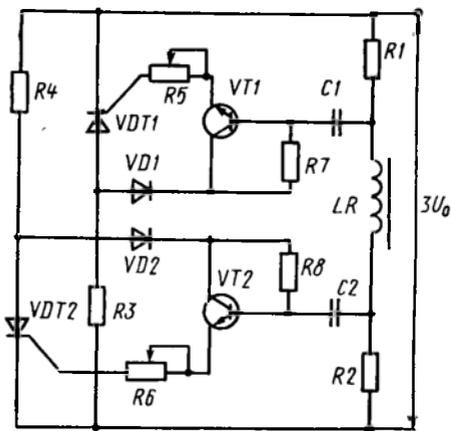


Рис. 7.11. Защита трансформатора напряжения от переходных процессов в сети

жении $3U_0$ высших гармонических ток в цепи $R1-LR-R2$ мал вследствие большого сопротивления реактора и падение напряжения на резисторах также недостаточно для создания необходимого тока управления.

Устройство приходит в действие только при появлении в напряжении $3U_0$ субгармонических составляющих. При этом в связи с уменьшением индуктивного сопротивления реактора ток в цепи $R1-LR-R2$ возрастает. Падение напряжения на резисторах $R1$ и $R2$ увеличивается и становится достаточным для открытия транзисторов $VT1$ и $VT2$. Токами транзисторов поочередно открываются тиристоры, подключая нагрузочные резисторы $R3$ и $R4$ к обмотке ТН. Дiodы $VD1$ и $VD2$ защищают транзисторы от обратного напряжения, а

переменные резисторы R_5 и R_6 предназначены для установки напряжения срабатывания защиты.

§ 7.7. УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ В СЕТЯХ С ИЗОЛИРОВАННЫМИ НЕЙТРАЛЯМИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Повреждения трансформатора напряжения контроля изоляции (ТН) при дуговых замыканиях на землю можно исключить, если разземлить нейтраль его первичной обмотки, т. е. разомкнуть путь протекания тока нулевой последовательности через эту обмотку. Однако при разземлении нейтрали первичные обмотки трансформатора напряжения окажутся включенными не на фазные напряжения, а на напряжения фаз по отношению к нулевой точке системы междуфазных напряжений. Они в отличие от фазных напряжений не содержат составляющих нулевой последовательности, поэтому вторичная обмотка ТН, соединенная в разомкнутый треугольник, не может быть использована для контроля состояния изоляции сети как фильтр напряжения нулевой последовательности.

В Ставропольэнерго для этого использовано то обстоятельство, что в каждой фазе ТН между его первичной и вторичной обмотками имеется некоторая емкость [65]. Так, для НТМИ-10-66 она составляет около 100 пФ. Вторичная обмотка ТН заземлена, поэтому междуобмоточные емкости трех фаз образуют звезду с заземленной нейтралью. Заземление осуществлено через обмотку реле. В нормальном режиме через реле идет ток небаланса, близкий к нулю, а при замыкании на землю в первичной сети ток резко возрастает, приводя к срабатыванию реле.

Однако если согласиться с разземлением нейтрали как типовым решением при проектировании новых электроустановок, то следует поставить под сомнение использование трехфазных трансформаторов напряжения для питания цепей измерительных приборов. В этом случае целесообразнее применить два однофазных трансформатора, соединенных в неполный треугольник. При такой схеме соединения обмоток невозможно воспользоваться предложением Ставропольэнерго. Если же учесть, что частые повреждения ТН привели к тому, что эти трансформаторы стали дефицитом и в ряде случаев электрические сети эксплуатируются без контроля изоляции, то станет очевидной необходимость отыскания новых путей контроля изоляции без использования трансформаторов напряжения в сетях с изолированными нейтральями.

Одним из таких путей может быть использование тока утечки опорных изоляторов [66]. Если три изолятора разных фаз в одной из ячеек РУ прикрепить к шинам верхними фланцами, а нижние — не крепить на металлических частях ячейки и объединить шинкой, то последняя образует нулевую точку звезды сопротивлений утечки

изоляторов. Между этой точкой и землей следует включить устройство контроля изоляции. Токи утечки изоляторов невелики, но полупроводниковые операционные усилители позволяют сделать устройство контроля чувствительным к ним.

Такой способ контроля изоляции возможен только в том случае, если звезда сопротивлений утечки достаточно симметрична, т. е. сопротивления утечки трех изоляторов примерно одинаковы.

Результаты измерений показали, что отклонения сопротивления ΔR от среднего значения R не превышают 2,3% у изоляторов ОФ-6-375 и 3,7% у изоляторов ОФ-10-375. Столь малые отклонения подтвердили возможность практической реализации рассматриваемого пути контроля изоляции.

Устройство контроля изоляции не должно действовать при токе небаланса, обусловленном неравенством сопротивлений R_A , R_B и R_C трех изоляторов. В общем случае ток небаланса

$$I_{нб} = \underline{U}_A/R_A + \underline{U}_B/R_B + \underline{U}_C/R_C, \quad (7.9)$$

где \underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C — напряжения фаз относительно земли.

Этот ток максимален, когда два из сопротивлений звезды имеют отклонения от среднего значения в одну сторону, а третье — в противоположную, например $R_A = R - \Delta R$ и $R_B = R_C = R + \Delta R$. Будем считать, что

$$|\underline{U}_A| = |\underline{U}_B| = |\underline{U}_C| = |\underline{U}/\sqrt{3}|,$$

где \underline{U} — напряжение сети, тогда (7.9) принимает вид

$$I_{нб \max} = \frac{U}{\sqrt{3}} \left(\frac{1}{R - \Delta R} - \frac{1}{R + \Delta R} \right).$$

Ток срабатывания устройства сигнализации выбирается по условию

$$I_{с.р} = k_{отс} I_{нб \max}, \quad (7.10)$$

где $k_{отс}$ — коэффициент отстройки.

При металлическом замыкании на землю смещение нейтрали оказывается наибольшим, чему соответствует наибольшая чувствительность устройства сигнализации. Если же замыкание произошло через переходное сопротивление, то напряжение нулевой последовательности $U_{0к}^{(1)}$ оказывается меньше напряжения фазы U_ϕ относительно земли при нормальной работе, что снижает чувствительность устройства.

Оценим рассмотренное устройство сигнализации по минимальному значению коэффициента полноты замыканий $\beta = U_{0к}^{(1)}/U_\phi$, при которой сигнализация действует с требуемой чувствительностью. Для этого примем, что замыкание на землю произошло в фазе А. Тогда из нулевой точки звезды изоляторов идет ток

$$I_3 = \frac{U_\phi + 2U_{0к}^{(1)}}{R + \Delta R} - \frac{U_\phi - U_{0к}^{(1)}}{R - \Delta R} = \frac{U}{\sqrt{3}} \left(\frac{1 + 2\beta}{R + \Delta R} - \frac{1 - \beta}{R - \Delta R} \right). \quad (7.11)$$

Для определения коэффициента чувствительности k_χ разделим (7.11) на (7.10) и после преобразований получим

$$k_\chi = \frac{3\beta R - \beta \Delta R - 2\Delta R}{2k_{отс} \Delta R},$$

откуда

$$\beta = \frac{k_{отс} k_\chi + 1}{1,5(R/\Delta R) - 0,5}.$$

Для изоляторов ОФ-6-375 $R=464 \cdot 10^8$ Ом и $\Delta R=10,4 \cdot 10^8$ Ом, а для изоляторов ОФ-10-375 $R=787 \cdot 10^8$ Ом и $\Delta R=29 \cdot 10^8$ Ом [66]. Это с $k_{отс}=3$ и $k_{\phi}=1,5$ обеспечивает действие сигнализации при $\beta=0,083$ и $\beta=0,135$ в сетях 6 и 10 кВ соответственно.

Для сопоставления найдем тот же показатель у общепринятой схемы сигнализации с присоединением обмотки реле ко вторичным обмоткам трансформатора напряжения, соединенным в разомкнутый треугольник. Реле этой сигнализации имеет напряжение срабатывания $U_{с.р}=k_{отс}U_{нб}$, где $U_{нб}=3 \dots 4$ В — напряжение небаланса. К реле подведено напряжение $U_p=3U_0=3\beta U_{\phi}$, причем $3U_{\phi}=100$ В (это достигнуто соответствующим выбором коэффициента трансформации). Таким образом, устройство имеет коэффициент чувствительности

$$k_{\phi} = \frac{U_p}{U_{с.р}} = \frac{3\beta U_{\phi}}{k_{отс} U_{нб}}.$$

Отсюда

$$\beta = \frac{k_{отс} k_{\phi} U_{нб}}{3U_{\phi}}.$$

При тех же коэффициентах отстройки и чувствительности получаем $\beta=0,135 \dots 0,18$. Таким образом, у обоих устройств сигнализации минимальный коэффициент полноты замыкания имеет один и тот же порядок, т. е. их поведение при замыканиях через переходное сопротивление равноценно.

Схему устройства контроля изоляции см. на рис. 7.12 (верхний), где R_A , R_B и R_C — сопротивления утечки изоляторов; RG — входной шунт, A — операционный усилитель, KL — выходное реле, VF — пробивной предохранитель (разрядник), предотвращающий появление высокого напряжения в цепях сигнализации при пробое изоляторов или перекрытия по их поверхности. Совместно с усилителем К140УД1Б может быть использовано реле РП-7 с сопротивлением обмотки 8 кОм, подключенное через выпрямительный мост VS из диодов КД102.

Достоинство устройства — указанная выше чувствительность. Один из недостатков — необходимость в источнике постоянного оперативного тока для питания операционного усилителя. Другой недостаток такой же, как и в устройстве контроля Ставропольэнерго, — невозможность определения того, какая именно из фаз замкнулась на землю. Для определения поврежденной фазы должен использоваться индикатор напряжения. Если же пойти на увеличение числа операционных усилителей до четырех, то этот недостаток устраняется. На рис. 7.12 (средний) контроль наличия напряжения делается с помощью трех ламп $HL1$ — $HL3$, включенных к выходам операционных усилителей $A1$ — $A3$. Погасшая лампа указывает поврежденную фазу. Усилитель $A4$ (суммирующий) обеспечивает действие реле сигнализации [66].

Второй способ контроля изоляции, рассматриваемый ниже, основан на создании звезды сопротивлений не из опорных изоляторов, а из высоковольтных конденсаторов. Например, отечественная промышленность выпускает конденсаторы ФГТ, имеющие вид стержней с резьбовыми шпильками по торцам в качестве выводов. Выпускаются конденсаторы и других типов, но конденсаторы ФГТ наиболее

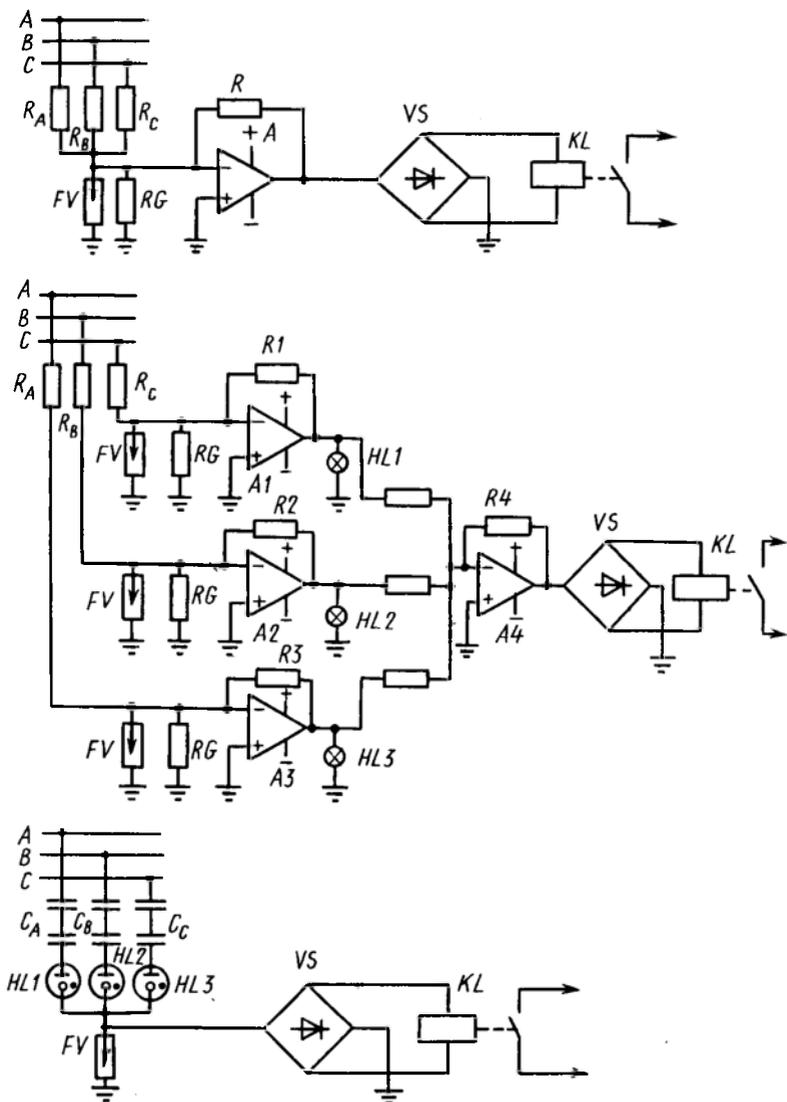


Рис. 7.12. Устройства бестрансформаторного контроля изоляции

удобны для монтажа. Три таких конденсатора можно укрепить на шинах так же, как это было описано выше для трех опорных изоляторов.

Конденсаторы ФГТ-4 с рабочим напряжением 20 кВ и емкостью 2200 пФ имеют разброс емкости $\pm 20\%$. Этому при тех же значениях $k_{отс}=3$ и $k_4=1,5$ соответствует коэффициент $\beta=0,688$. Это значительно больше, чем у ранее рассмотренных устройств. Большая величина β получена в предположении, что конденсаторы в устройстве контроля установлены без специального подбора, причем разброс их емкости оказался самым неблагоприятным. Если же применить подбор конденсаторов по их фактической (а не паспортной) емкости, то можно снизить ток небаланса и соответственно увеличить чувствительность сигнализации к замыканиям через переходное сопротивление.

Учитывая возможность четырехкратного повышения напряжения, следует в каждой фазе установить последовательно два конденсатора ФГТ-4. Хотя емкость в фазе снизится до 1100 пФ, выходной ток звезды конденсаторов при замыкании фазы на землю будет достаточен для действия реле без применения усилителей.

Переход от опорных изоляторов к конденсаторам ФГТ увеличивает ток в лучах звезды настолько, что для обнаружения поврежденной фазы становится возможным последовательно с конденсаторами устанавливать сигнальные неоновые лампы (например, типа МН-3 или МН-7). Схема устройства показана на рис. 7.12 (нижний).

Глава 8

ДИСТАНЦИОННЫЕ ЗАЩИТЫ

§ 8.1. НАЗНАЧЕНИЕ, ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ОРГАНЫ ЗАЩИТЫ

Назначение и принцип действия. В схемах электроснабжения в зависимости от режима работы и вида короткого замыкания изменяются токи повреждения, поэтому чувствительность токовых и токовых направленных защит, зоны действия отсечек не остаются постоянными. В минимальном режиме работы системы электроснабжения они могут оказаться недостаточными. В сложных сетях максимальная токовая направленная защита не всегда удовлетворяет требованиям селективности и быстрodeйствия. В связи с этим желательно иметь защиту, характеристическая величина которой не зависит от режима работы системы электроснабжения, а время действия защиты определяется только расстоянием от места ее установки до места короткого замыкания. Такой защитой является *дистанционная защита*. Она реагирует на отношение напряжения к току в месте установки защиты. Это отношение называется *сопротивлением на зажимах реле защиты*. При соответствующем включении реле это сопротивление пропорционально расстоянию от места установки защиты до места короткого замыкания и не зависит от режима работы системы электроснабжения. В измери-

тельных органах защиты используют рассмотренные выше (см. § 3.5) измерительные реле сопротивления.

Дистанционная защита, как и токовая, обычно выполняется трехступенчатой с относительной селективностью. Параметрами каждой ступени являются длина защищаемой зоны и время срабатывания. По характеристикам выдержек времени ее первая, вторая и третья ступени аналогичны соответствующим ступеням токовой защиты. Это иллюстрируется графиками (рис. 8.1, а). Защита $A1$ имеет характеристику 1, защита $A2$ — характеристику 2, защита $A3$ — характеристику 3. При повреждении в точке K_1 приходят в действие защиты $A1$ и $A2$, но повреждение отключает ближайшая

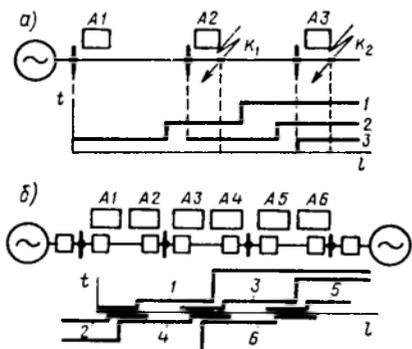


Рис. 8.1. Ступенчатые характеристики выдержек времени дистанционной защиты

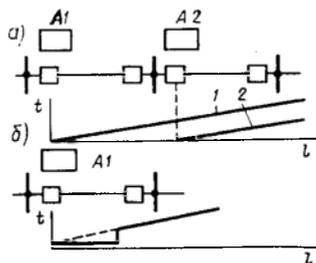


Рис. 8.2. Характеристики выдержки времени дистанционной защиты:

а — непрерывно зависящие; б — комбинированные

к нему защита $A2$, так как она имеет меньшую выдержку времени. Если повреждение возникает в точке K_2 , то оно отключается ближайшей к нему защитой $A3$.

На линиях с двусторонним питанием дистанционная защита выполняется направленной, а выдержки времени соответствующих ступеней защиты выбираются, как и у токовой направленной защиты, по встречно-ступенчатому принципу (рис. 8.1, б). Селективное действие могут обеспечивать также дистанционные защиты с непрерывно зависящими (рис. 8.2, а) и комбинированными (рис. 8.2, б) характеристиками.

Основные органы защиты. Функциональная схема дистанционной направленной трехступенчатой защиты показана на рис. 8.3, а. Каждая ступень защиты содержит измерительный орган. У первой и второй ступеней — это ненаправленные или направленные реле сопротивления — *дистанционные органы* $KZII$ и $KZIII$. Измерительный орган третьей ступени — реле $KAIII$ ($KZIII$) — является одновременно *пусковым органом* всей защиты. Он срабатывает при повреждении в любой зоне и осуществляет пуск защиты (например, замыкает цепь оперативного тока). Пусковым органом

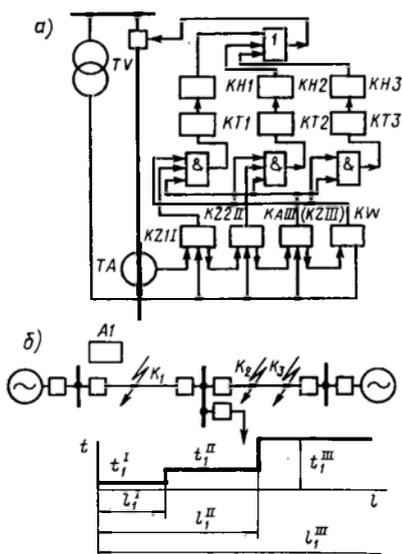


Рис. 8.3. Дистанционная направленная трехступенчатая защита

дистанционной защиты могут быть или максимальные реле тока (K_{III}), или минимальные реле сопротивления (K_{ZIII}). Они должны иметь высокую чувствительность, не действовать при максимальной нагрузке и по возможности не действовать при качаниях. Иногда пусковой орган должен обладать избирательностью действия, т. е. выбирать поврежденные фазы.

Простота пускового органа тока обуславливает его применение в дистанционных защитах сетей напряжением до 35 кВ. При включении на токи фаз пусковой орган реагирует на токи нагрузки и качаний так же, как и на токи повреждений, поэтому иногда пусковой орган включает-ся на ток обратной последовательности. При этом чувствитель-

ность защиты повышается. Действие такой защиты при трехфазных коротких замыканиях обеспечивается благодаря кратковременной несимметрии в начальный момент возникновения короткого замыкания.

Использование пускового органа сопротивления позволяет повысить чувствительность защиты, так как, реагируя на отношение $U_p/I_p = Z_p$, он более четко отличает перегрузки (Z_p изменяется незначительно) от коротких замыканий (Z_p уменьшается заметно). Пусковой орган полного сопротивления применяется в защитах линий напряжением 35 кВ и коротких малозагруженных линий напряжением 110 кВ. На длинных загруженных линиях напряжением 110 кВ и выше сопротивление на зажимах реле в рабочем режиме $Z_{p,раб}$ соизмеримо с сопротивлением линии $Z_{л}$, поэтому пусковой орган полного сопротивления не обеспечивает достаточной чувствительности защиты. Наличие существенной разницы в углах сопротивлений $Z_{p,раб}$ и $Z_{л}$ ($\varphi_{p,раб} < \varphi_{л}$) позволяет использовать в защитах указанных линий направленный пусковой орган сопротивления, в котором применяются реле с углом максимальной чувствительности $\varphi_{рmax} \approx \varphi_{л}$ (см. рис. 3.32, б, в).

Схемы включения пусковых реле сопротивления зависят от того, предъявляется к ним или не предъявляется требование избирательности: реле неизбирательных органов включаются на между-

фазные напряжения и соответствующие разности фазных токов, а избирательных — на междуфазные напряжения и фазные токи (для действия при многофазных коротких замыканиях) или на одноименные фазные напряжения и токи (для действия при однофазных и двойных замыканиях на землю).

Орган направления мощности — реле KW — предотвращает срабатывание защиты при направлении мощности к шинам подстанции и предусматривается в тех случаях, когда пусковой орган и дистанционные органы не обладают направленностью действия. Орган выдержек времени — реле $KT1$ — $KT3$ — совместно с другими органами формирует трехступенчатую характеристику защиты.

Действие защиты. Действие защиты при повреждении в различных точках системы электроснабжения рассмотрим на примере защиты $A1$ (рис. 8.3, б). Орган направления мощности позволяет действовать защите только при направлении мощности от шин в линию, т. е. при коротких замыканиях в точках K_1 , K_2 , K_3 . Во всех случаях срабатывает пусковой орган. Если повреждение происходит в пределах первой зоны l_1^I (точка K_1), то срабатывают также дистанционные органы $KZ1I$ и $KZ2II$. При этом приходят в действие все реле времени. Однако раньше других срабатывает реле времени $KT1$, как имеющее наименьшую уставку t_1^I . Защита отключает выключатель с выдержкой времени первой ступени. Поведение защиты при коротком замыкании во второй зоне l_1^{II} (точка K_2) отличается тем, что дистанционный орган $KZ1I$ не срабатывает, поэтому приходят в действие только реле $KT2$ и $KT3$. Раньше срабатывает реле времени $KT2$, определяющее выдержку времени второй ступени, и защита сможет отключить выключатель с временем t_1^{II} как резервная. При коротком замыкании в точке K_3 оба дистанционных органа не срабатывают, а с выдержкой времени t_1^{III} , создаваемой реле времени $KT3$, действует третья ступень защиты, осуществляя дальнейшее резервирование.

При неисправностях в цепях напряжения TU и в режиме качаний в системе защита может сработать неправильно. Для исключения этого дистанционную защиту снабжают блокировками, выводящими ее из действия при возникновении указанных режимов.

Отдельное реле времени $KT1$ для первой ступени, как правило, не применяется, и время действия первой ступени, как и в трехступенчатой токовой защите, определяется только собственным временем срабатывания пускового и измерительного органов. Иногда функции нескольких органов выполняют сложные измерительные реле. Так, направленное реле сопротивления выполняет функции органа направления мощности и дистанционного, а иногда и пускового. Схема дистанционной защиты при этом упрощается.

§ 8.2. ВЫБОР ВХОДНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ВЕЛИЧИН ДИСТАНЦИОННЫХ ОРГАНОВ

Реле сопротивления дистанционного органа реагирует на понижение отношения напряжения U_p к току I_p . При коротких замыканиях напряжения поврежденных фаз уменьшаются, а токи возрастают. Поэтому в U_p обязательно должно входить напряжение, а в

\underline{I}_p — ток поврежденных фаз. Для действия защиты при многофазных коротких замыканиях при формировании \underline{U}_p и \underline{I}_p можно использовать одноименные фазные напряжения и токи или междуфазные напряжения и соответствующие разности фазных токов. При выборе \underline{U}_p и \underline{I}_p необходимо, чтобы при всех видах многофазных коротких замыканий сопротивления $\underline{Z}_p = \underline{U}_p / \underline{I}_p$ были одинаковыми и пропорциональными расстоянию до места повреждения. Исходя из этих требований и определяются необходимые напряжения \underline{U}_p и ток \underline{I}_p .

Трехфазное короткое замыкание. Напряжения и токи соответствующих фаз связаны между собой соотношением $\underline{U}^{(3)} = I^{(3)} \underline{Z}_{1уд} l_k$, где $\underline{U}^{(3)}$ — фазное или междуфазное напряжение в месте установки защиты (остаточное напряжение короткого замыкания), В; $I^{(3)}$ — соответственно фазный или равный разности токов одноименных (с междуфазным напряжением) фаз ток к.з., А; l_k — расстояние от места установки защиты до места короткого замыкания, км. Например, при $\underline{U}_p^{(3)} \sim \underline{U}_{AB}^{(3)}$, $\underline{I}_p \sim (I_A^{(3)} - I_B^{(3)})$ сопротивление

$$\underline{Z}_p^{(3)} \sim \underline{U}_{AB}^{(3)} / (I_A^{(3)} - I_B^{(3)}) = \underline{Z}_{1уд} l_k,$$

т. е. указанное требование удовлетворяется.

Двухфазное короткое замыкание. При коротком замыкании между фазами, например В и С, напряжения поврежденных фаз в месте установки защиты можно выразить через симметричные составляющие. При $\underline{Z}_{2уд} = \underline{Z}_{1уд}$

$$\underline{U}_B^{(2)} = \underline{U}_{1Вк}^{(2)} + I_{1В}^{(2)} \underline{Z}_{1уд} l_k + \underline{U}_{2Вк}^{(2)} + I_{2В}^{(2)} \underline{Z}_{2уд} l_k = \underline{U}_{Вк}^{(2)} + I_{В}^{(2)} \underline{Z}_{1уд} l_k,$$

где $\underline{U}_{1Вк}^{(2)}$ и $\underline{U}_{2Вк}^{(2)}$ — соответственно напряжение прямой и обратной последовательностей фазы В в точке к.з. Аналогично, для фазы С

$$\underline{U}_C^{(2)} = \underline{U}_{Ск}^{(2)} + I_C^{(2)} \underline{Z}_{1уд} l_k.$$

Для того чтобы сопротивление \underline{Z}_p осталось пропорциональным сопротивлению $\underline{Z}_{1уд} l_k$, необходимо принять $\underline{U}_p \sim \underline{U}_{ВС}$ и $\underline{I}_p \sim (I_B - I_C)$. В действительности, имея в виду, что $\underline{U}_{Вк}^{(2)} = \underline{U}_{Ск}^{(2)}$ [14], можно получить $\underline{U}_p \sim \underline{U}_{ВС}^{(2)} = (I_B^{(2)} - I_C^{(2)}) \underline{Z}_{1уд} l_k$ и $\underline{Z}_p \sim \underline{Z}_{1уд} l_k$. Если включить реле на фазное напряжение и соответствующий фазный ток, например на \underline{U}_B и \underline{I}_B , то

$$\underline{Z}_p^{(2)} \sim \underline{Z}_{1уд} l_k + \underline{U}_{Вк}^{(2)} / I_B^{(2)},$$

т. е. указанное требование не выполняется.

Двухфазное короткое замыкание на землю. При двухфазном коротком замыкании на землю фаз В и С

$$\underline{U}_B^{(1,1)} = \underline{U}_{1Вк}^{(1,1)} + I_{1В}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд} l_k + \underline{U}_{2Вк}^{(1,1)} + I_{2В}^{(1,1)} \underline{Z}_{2уд} l_k + \underline{U}_{0к}^{(1,1)} + I_0^{(1,1)} \underline{Z}_{0уд} l_k.$$

Имея в виду, что $\underline{U}_{1Вк}^{(1,1)} + \underline{U}_{2Вк}^{(1,1)} + \underline{U}_{0к}^{(1,1)} = 0$ [14], можно получить

$$\underline{U}_B^{(1,1)} = I_{1В}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд} l_k + I_{2В}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд} l_k + I_0^{(1,1)} \underline{Z}_{0уд} l_k.$$

Аналогично, для фазы С

$$\underline{U}_C^{(1,1)} = I_{1С}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд} l_k + I_{2С}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд} l_k + I_0^{(1,1)} \underline{Z}_{0уд} l_k.$$

Как и при двухфазном коротком замыкании, сопротивление $\underline{Z}_p^{(1,1)}$ пропорционально $\underline{Z}_{1уд}l_k$, если принять $\underline{U}_p \sim \underline{U}_{BC}$ и

$$\underline{I}_p \sim (\underline{I}_B - \underline{I}_C).$$

Действительно,

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BC}^{(1,1)} &= \underline{I}_{1B}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд}l_k + \underline{I}_{2B}^{(1,1)} \underline{Z}_{уд}l_k - \\ &- \underline{I}_{1C}^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд}l_k - \underline{I}_{2C}^{(1,1)} \underline{Z}_{уд}l_k. \end{aligned}$$

Напряжение $\underline{U}_{BC}^{(1,1)}$ не изменяется, если прибавляется и вычитается $\underline{I}_0^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд}l_k$. При этом получается

$$\underline{U}_{BC}^{(1,1)} = (\underline{I}_B^{(1,1)} - \underline{I}_C^{(1,1)}) \underline{Z}_{1уд}l_k.$$

При включении реле на фазные ток и напряжение, например на ток \underline{I}_B и напряжение \underline{U}_B , сопротивление \underline{Z}_p не пропорционально сопротивлению $\underline{Z}_{1уд}l_k$.

Полученное выше выражение для $\underline{U}_B^{(1,1)}$ можно преобразовать. Если прибавить и вычесть $\underline{I}_0^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд}l_k$, то получается

$$\underline{U}_B^{(1,1)} = \underline{I}_B^{(1,1)} \underline{Z}_{1уд}l_k + \underline{I}_0^{(1,1)} (\underline{Z}_{0уд} - \underline{Z}_{1уд})l_k,$$

отсюда

$$\underline{Z}_p^{(1,1)} \sim \underline{Z}_{1уд}l_k + (\underline{Z}_{0уд} - \underline{Z}_{1уд})l_k \underline{I}_0^{(1,1)} \underline{I}_B^{(1,1)},$$

Рассмотренные соотношения справедливы и для однофазного короткого замыкания на землю, и для участка с $\underline{I}_0 \neq 0$ при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированными и компенсированными нейтральями.

Для обеспечения $\underline{Z}_p \sim \underline{Z}_{1уд}l_k$ при различных видах многофазных коротких замыканий следует включать дистанционные органы на междуфазные напряжения и соответствующие разности фазных токов. Для этого необходимо иметь три реле сопротивления на ступень защиты. Одно из них включается на напряжение $\underline{U}_p = \underline{U}_{ab}$ и ток $\underline{I}_p = (\underline{I}_a - \underline{I}_b)$, второе — на $\underline{U}_p = \underline{U}_{bc}$, $\underline{I}_p = (\underline{I}_b - \underline{I}_c)$, третье — на $\underline{U}_p = \underline{U}_{ca}$, $\underline{I}_p = (\underline{I}_c - \underline{I}_a)$.

Однако при однофазных коротких замыканиях на землю в сетях с глухозаземленными нейтральями и при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированными или компенсированными нейтральями на участках с $\underline{I}_0 \neq 0$ реле, включенные указанным образом, не могут правильно измерять расстояние до точки короткого замыкания. Поэтому приходится предусматривать дистанционные органы для действия при однофазных коротких замыканиях и двойных замыканиях на землю.

При включении реле на фазные напряжения и токи сопротивление \underline{Z}_p , как указывалось, зависит не только от расстояния l_k , но и от отношения $\underline{I} / \underline{I}_\phi$, которое определяется состоянием нейтралей, местом повреждения, схемой электроснабжения и для одной и той же линии может изменяться в широких пределах. Поэтому для правильного замера сопротивления при $\underline{U}_p = \underline{U}_\phi$ к реле необходимо подвести ток, отличающийся от фазного,

При коротком замыкании на землю напряжение поврежденной фазы (аналогично $\underline{U}_R^{(1,1)}$)

$$\begin{aligned}\underline{U}_\phi &= I_\phi Z_{1уд} l_k + I_0 (Z_{0уд} - Z_{1уд}) l_k = \\ &= [I_\phi + I_0 (Z_{0уд} - Z_{1уд}) / Z_{1уд}] Z_{1уд} l_k.\end{aligned}$$

Для обеспечения $\underline{I}_p \sim \underline{Z}_{1уд} l_k$ необходимо принять $\underline{I}_p = \underline{I}_\phi + k I_0$, где $k = (Z_{0уд} - Z_{1уд}) / Z_{1уд}$.

При $\underline{Z}_{0уд} = 3,5 \underline{Z}_{1уд}$ коэффициент $k = 2,5$.

Соответствующая схема включения реле называется схемой с *токовой компенсацией*; ток \underline{I}_p формируется посредством промежуточных трансформаторов тока [10].

§ 8.3. СХЕМЫ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ

Анализ различных видов короткого замыкания (см. § 8.2) показывает, что для выполнения дистанционной защиты в общем случае необходимо иметь шесть реле сопротивления на одну ступень. Количество реле можно сократить до одного. В этом случае для правильного действия защиты необходимо ток и напряжение, подводимые к реле, автоматически менять в зависимости от вида повреждения. Так выполнена, например, защита ДЗ-10У2, в которой использовано рассмотренное выше полупроводниковое реле. Здесь автоматическое подключение реле к требуемому напряжению и току осуществляется бесконтактно с помощью миниселектора и максиселектора (см. § 3.5). Отечественная промышленность продолжает выпускать дистанционные защиты, например ПЗ-3, у которых в качестве пусковых органов используются электромеханические реле тока, а дистанционный орган выполнен на полупроводниковой элементной базе. У этого органа цепи тока и цепи напряжения переключаются при срабатывании пусковых органов.

Порядок переключения можно уяснить из рассмотрения рис. 8.4. В зависимости от того, в каких фазах происходит повреждение, к схеме сравнения дистанционного органа контактами промежуточных реле $KL1 - KL3$ подводятся необходимые электрические величины. Работой промежуточных реле $KL1, KL2$ управляют реле пускового органа $KA1 - KA3$, включенные на токи фаз, а работой промежуточного реле $KL3$ управляет реле KAZ , действующее при появлении тока нулевой последовательности (при двойных замыканиях на землю). Работу схемы в случае коротких замыканий между тремя и двумя фазами поясняет табл. 8.1.

При любом из указанных в таблице повреждений к реле сопротивления подводятся именно те электрические величины, отношение которых пропорционально сопротивлению петли короткого замыкания. В случаях двойных замыканий на землю (не указанных в табл. 8.1) срабатывает реле KAZ . При этом к дистанционному органу подводятся соответствующее фазное напряжение и ток $\underline{I}_p = \underline{I}_\phi + k I_0$. В рассмотренной схеме дистанционный орган отрегулирован на определенное сопротивление срабатывания. Поэтому дистанционная защита должна иметь по крайней мере два дистанционных органа, Один для первой, а другой — для второй ступени,

Таблица 8.1

Поврежденные фазы	Срабатывают реле		Ток и напряжение, подводимые к реле сопротивления	
	тока	промежуточные	\underline{I}_p	\underline{U}_p
A—B—C	KA1, KA2, KA3	KL1, KL2	$\underline{I}_a - \underline{I}_c$	\underline{U}_{ac}
A—B	KA1, KA2	KL1	$\underline{I}_a - \underline{I}_b$	\underline{U}_{ab}
B—C	KA2, KA3	KL2	$\underline{I}_b - \underline{I}_c$	\underline{U}_{bc}
C—A	KA1, KA3	KL1, KL2	$\underline{I}_a - \underline{I}_c$	\underline{U}_{ac}

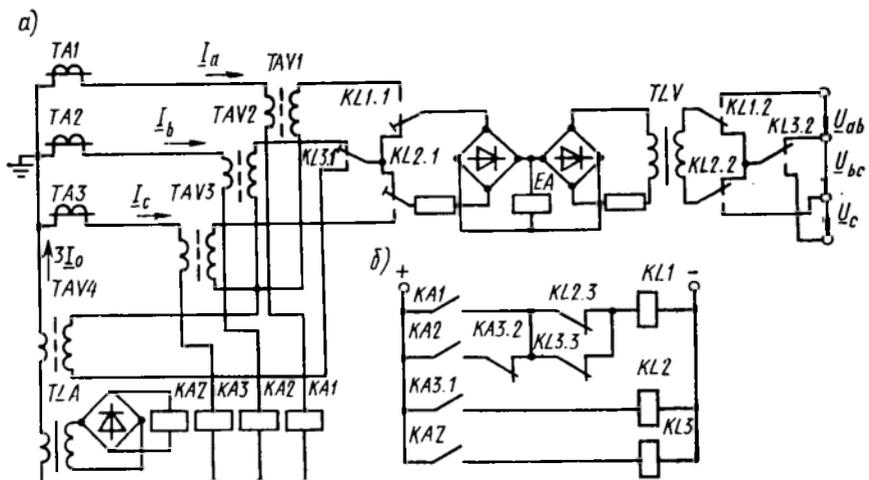


Рис. 8.4. Дистанционный орган защиты типа ПЗ-3

Защиту можно выполнить всего лишь с одним дистанционным органом, если автоматически менять его уставку от значения сопротивления срабатывания $Z'_{c.p}$ первой ступени до значения сопротивления срабатывания $Z''_{c.p}$ второй ступени при повреждении за пределами первой зоны. Такой является, например, защита БРЭ-2701, предназначенная для сетей напряжением до 35 кВ [67]. Функциональная схема защиты показана на рис. 8.5, а. В качестве дистанционного органа КЗ применено направленное реле сопротивления. Вместе с органами выдержки времени $KT1 - KT3$ он формирует трехступенчатую характеристику защиты. Направленное реле сопротивления ведет себя как дистанционный орган только при повреждении в пределах первой и второй зоны. При этом его характеристика срабатывания имеет вид, показанный на рис. 8.5, б.

Она образована тремя дугами 1, 2, 3. При повреждении в третьей зоне характеристика реле сопротивления автоматически преобразуется в характеристику реле направления мощности, ограниченную прямыми 4 и 5 (рис. 8.5, б). Таким образом, третья ступень превращается в максимальную токовую направленную защиту.

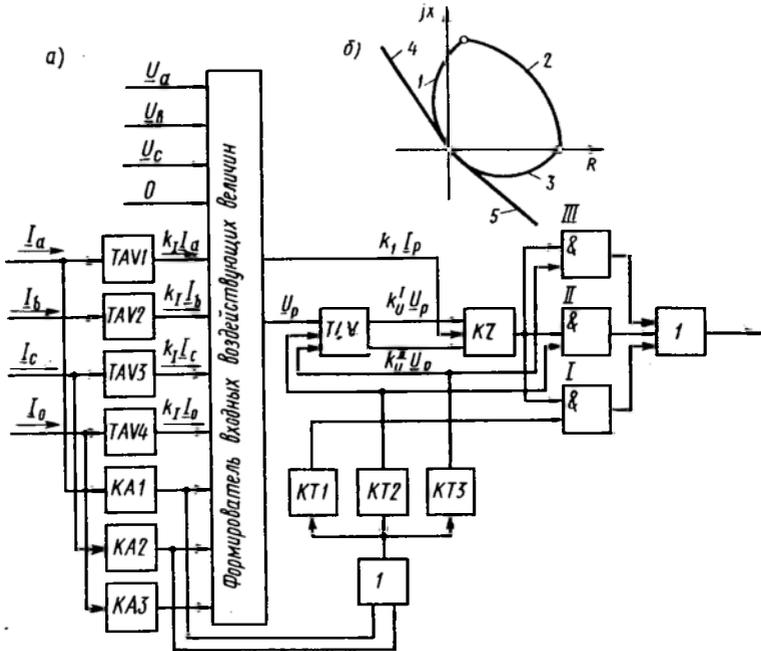


Рис. 8.5. Функциональная схема (а) и характеристики (б) дистанционной защиты комплекта БРЭ-2701

На вход формирователя входных воздействующих величин поданы фазные напряжения \underline{U}_a , \underline{U}_b , \underline{U}_c и напряжения $k_I I_a$, $k_I I_b$, $k_I I_c$ и $k_I I_0$, пропорциональные соответствующим фазным токам и току нулевой последовательности. Работой формирователя управляют пусковые органы $KA1$ — $KA3$ —полупроводниковые токовые реле. Функционирование формирователя при различных видах к.з. поясняет табл. 8.2.

Во всех случаях к дистанционному органу подводятся \underline{U}_p и $k_I I_p$, отношение которых пропорционально сопротивлению петли короткого замыкания. В исходном состоянии уставка дистанционного органа соответствует первой ступени $Z'_{c.p.} = k'_U \underline{U}_p / k_I I_p$. Защита (рис. 8.5, а) функционирует следующим образом. При повреждении в любой зоне срабатывают соответствующие пусковые органы (см. табл. 8.2) и через логический элемент ИЛИ запускают органы выдержки времени $KT1$ — $KT3$. Если короткое замыкание в первой зоне, то срабатывает дистанционный орган KZ . После срабатывания органа выдержки времени $KT1$ первой ступени через логический элемент ИИ и выходной логический элемент ИЛИ обеспечивается отключение выключателя,

Таблица 8.2

Вид повреждения	Поврежденные фазы	Работают реле тока	Формируемые входные воздействующие величины	
			$\underline{k}_I \underline{I}_p$	\underline{U}_p
Трехфазное к. з.	ABC	KA1, KA2	$\underline{k}_I (\underline{I}_a - \underline{I}_c)$	\underline{U}_{ac}
Двухфазные и двойные к. з. при $I=0$	AB	KA1	$\underline{k}_I (\underline{I}_a - \underline{I}_b)$	\underline{U}_{ab}
	BC	KA2	$\underline{k}_I (\underline{I}_b - \underline{I}_c)$	\underline{U}_{bc}
	CA	KA1, KA2	$\underline{k}_I (\underline{I}_a - \underline{I}_c)$	\underline{U}_{ac}
Двойные к. з. на разных линиях при $I_0 \neq 0$	A	KA1, KA3	$\underline{k}_I (\underline{I}_a + \underline{k} \underline{I}_0)$	\underline{U}_a
	B	KA3	—	—
	C	KA2, KA3	$\underline{k}_I (\underline{I}_c + \underline{k} \underline{I}_0)$	\underline{U}_c

При повреждении во второй зоне дистанционный орган сможет сработать только после изменения его уставки органом выдержки времени $KT2$ второй ступени. При срабатывании орган $KT2$ воздействует на переключающееся устройство, изменяющее коэффициент трансформации промежуточного трансформатора $TLV [Z_{c.p}^{II} = k_U^{II} \underline{U}_p / (\underline{k}_I \underline{I}_p)]$ и вместе с дистанционным органом через логический элемент ИИИ и выходной логический элемент ИЛИ отключают выключатель. Если повреждение происходит за пределами второй зоны, то, как и в предыдущем случае, при срабатывании органа $KT2$ дистанционный орган настраивается на уставку второй ступени, но не срабатывает. В этом случае защита действует как максимальная токовая направленная защита с выдержкой времени третьей ступени, так как после срабатывания органа выдержки времени $KT3$ третьей ступени характеристика дистанционного органа преобразуется в характеристику реле направления мощности (рис. 8.5, б).

§ 8.4. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Параметрами дистанционной защиты являются сопротивление срабатывания и выдержка времени. У защит со ступенчатой характеристикой каждая ступень имеет соответствующие параметры. При выборе сопротивления срабатывания необходимо учитывать влияние следующих факторов: переходного сопротивления дуги R_d в месте повреждения; токов подпитки от промежуточных подстанций; разветвления токов при сопряжении одиночной линии с двумя параллельными; погрешностей трансформаторов тока и напряжения и др. Некоторые из этих факторов (например, наличие R_d) могут увеличивать Z_p , а другие (разветвление токов) — уменьшать его. Возможные погрешности в работе реле сопротивления учитываются соответствующим выбором коэффициентов отстройки в расчетных формулах.

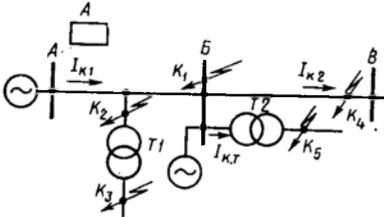
Выбор параметров срабатывания защиты со ступенчатой характеристикой. На примере сети, показанной на рис. 8.6, рассматривается выбор параметров трехступенчатой дистанционной защиты, установленной на подстанции А.

Первая ступень. Сопротивление срабатывания первой ступени $Z_{с.зА}^I$ выбирается таким, чтобы дистанционный орган не срабатывал при коротких замыканиях:

на шинах противоположной подстанции B (точка K_1); для этого необходимо принять

$$Z_{с.зА}^I \leq k_{отс}^I Z_{л}; \quad (8.1)$$

в месте подключения трансформатора $T1$ (точка K_2), если он соединяется через выключатель и при повреждении отключается собственной быстродействующей защитой, что выполняется при



$$Z_{с.зА}^I \leq k_{отс}^I Z_{уч}; \quad (8.2)$$

Рис. 8.6. Схема к согласованию дистанционных защит со ступенчатыми характеристиками

за трансформатором $T1$, если он присоединяется без выключателя (точка K_3), чему соответствует (без учета некоторого различия углов комплексных величин $Z_{л}$ и $Z_{т}$)

$$Z_{с.зА}^I \leq k_{отс}^I (Z_{уч} + Z_{т}). \quad (8.3)$$

В выражениях (8.1)—(8.3) $Z_{л}$ — сопротивление защищаемой линии AB ; $Z_{уч}$ — сопротивление участка линии от места установки защиты до точки присоединения трансформатора $T1$; $Z_{т}$ — сопротивление трансформатора $T1$; $k_{отс}^I = 0,8 \dots 0,85$.

Для линий с ответвлениями без выключателей на стороне высшего напряжения принимается меньшее из значений $Z_{с.зА}^I$, полученных по (8.1) и (8.3), а для линий, имеющих ответвления с выключателями, определяющим обычно является выражение (8.2).

Первая ступень, как правило, выполняется без выдержки времени, т. е. $t_A^I = 0$.

Вторая ступень. Дистанционный орган второй ступени не должен срабатывать при коротких замыканиях в конце первой зоны защиты смежной линии (точка K_4) и при коротких замыканиях за трансформатором $T2$ приемной подстанции (точка K_5). В соответствии с этим сопротивление срабатывания второй ступени принимается равным меньшему из найденных по выражениям

$$Z_{с.зА}^{II} \leq k_{отс}^{II} [Z_{л} + k'_{отс} (Z_{с.зВ}^I / k_{р.л})], \quad (8.4)$$

$$Z_{с.зА}^{II} \leq k_{отс}^{II} [Z_{л} + (1 - \Delta n_{т\max})^* (Z_{т} / k_{р.т})], \quad (8.5)$$

где $Z_{с.зВ}^I$ — сопротивление срабатывания первой ступени защиты смежной линии BB ; $Z_{т}$ — сопротивление наиболее мощного трансформатора $T2$ подстанции B ; $\Delta n_{т\max}^*$ — максимальное относительное отклонение коэффициента трансформации, обусловленное его

регулированием (см. § 13.10); $k'_{отс}$ — коэффициент отстройки, учитывающий погрешность сопротивления срабатывания $\underline{Z}_{с.з.Б}^I$; $k'_{отс} < 1,0$; $k_{р.л}$, $k_{р.т}$ — коэффициенты токораспределения, учитывающие неравенство токов в месте повреждения ($I_{к2}$ или $I_{к.т}$) и в месте установки защиты ($I_{к1}$), $k_{р.л} = I_{к1}/I_{к2}$, $k_{р.т} = I_{к1}/I_{к.т}$.

Выдержка времени второй ступени t_A^{II} выбирается на ступень селективности Δt больше времени срабатывания t_B^I первой ступени дистанционной защиты линии $БВ$ и t_τ быстродействующих защит трансформаторов подстанции $Б$. Вторая ступень защиты должна удовлетворять требованиям чувствительности. Считается достаточным $k_{IIч} = \underline{Z}_{с.з.А}^{II}/\underline{Z}_л \geq 1,25$. При недостаточной чувствительности $\underline{Z}_{с.з.А}^{II}$ увеличивается. Для предотвращения возможного излишнего срабатывания при коротком замыкании в пределах зоны второй ступени дистанционной защиты линии $БВ$ увеличивается и выдержка времени до $t_A^{II} = t_B^{II} + \Delta t$.

Третья ступень. Измерительным органом третьей ступени является пусковой орган защиты. Ток срабатывания реле тока пускового органа определяется, как и для реле максимальной токовой направленной защиты. При выполнении пускового органа с использованием направленных реле сопротивления осуществляется отстройка от минимально возможного сопротивления в рабочем режиме с учетом самозапуска электродвигателей:

$$\underline{Z}_{с.з.А}^{III} = U_{раб\ min} / [V\sqrt{3} I_{раб\ max} k_{отс} k_\beta k_{сзп} \cos(\varphi_{раб} - \varphi_{р\ max\ ч})], \quad (8.6)$$

где $k_\beta > 1$ — коэффициент возврата минимального реле сопротивления; $k_{сзп}$ — коэффициент самозапуска, учитывающий снижение $\underline{Z}_р$ за счет увеличения тока и уменьшения напряжения при самозапуске электродвигателей; $\varphi_{раб}$ — угол сдвига фаз между $U_{раб\ min}$ и $I_{раб\ max}$; $\varphi_{р\ max\ ч}$ — угол максимальной чувствительности, принимаемый равным углу сопротивления линии φ_l .

Найденное по (8.6) значение $\underline{Z}_{с.з.А}^{III}$ представляет собой диаметр окружности, являющейся характеристикой срабатывания защиты (см. рис. 3.32, б). Для защиты с пусковыми реле полного сопротивления уставку сопротивления срабатывания выбирают по (8.6), принимая $(\varphi_{раб} - \varphi_{р\ max\ ч}) = 0$. При этом $\underline{Z}_{с.з.А}^{III}$ является радиусом окружности с центром в начале координат (см. рис. 3.32, а).

Выдержку времени третьей ступени t_A^{III} определяют, как и для токовых направленных защит, по встречно-ступенчатому принципу. Третья ступень должна обладать достаточной чувствительностью. При коротком замыкании в конце защищаемой линии необходимо иметь $k_{IIIч} \geq 1,5$. При повреждении в конце смежных элементов желательно, чтобы $k_{IIIч} \geq 1,2$. Для получения таких коэффициентов чувствительности в ряде случаев приходится ис-

пользовать пусковые органы сопротивления со сложной характеристикой срабатывания, например в виде треугольника [28].

Выбор параметров срабатывания защиты с линейно зависимой характеристикой. Для линий напряжением 6—20 кВ выпускается односистемная ненаправленная дистанционная защита полного сопротивления типа ДЗ-10-У2. Защита применяется прежде всего в сельских сетях на многократно секционированных радиальных линиях с сетевым резервированием. Пусковым органом защиты является трехфазное реле полного сопротивления.

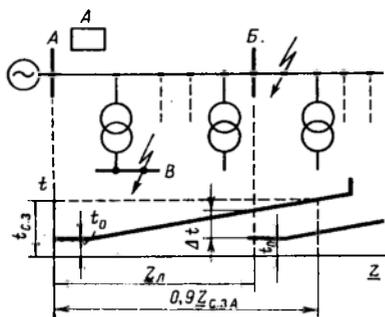


Рис. 8.7. Согласование дистанционных защит с комбинированными характеристиками

Орган тоже в трехфазном исполнении. Он срабатывает с выдержкой времени, линейно зависимой от удаленности места повреждения, т. е. от сопротивления на зажимах защиты (рис. 8.7). Это обуславливает некоторые дополнительные требования к выбору параметров защиты. Схема и принцип действия дистанционного органа защиты рассмотрены выше (см. § 3.5).

В защите ДЗ-10-У2 нет явно выраженных ступеней. Она по существу является одноступенчатой защитой, поэтому выбор ее параметров сводится к определению сопро-

тивления срабатывания $\underline{Z}_{с.з.}$ и расчетной уставки времени срабатывания $t_{с.з.}$.

Выбор сопротивления срабатывания. Сопротивление срабатывания защиты $\underline{Z}_{с.з.А}$ определяется следующим образом: для обеспечения коэффициента чувствительности $k_{\text{ч}}=1,5$ при коротком замыкании в конце линии принимается $\underline{Z}_{с.з.А}=1,5 \underline{Z}_{л}$; для отстройки от нагрузочного режима $\underline{Z}_{с.з.А}$ определяется по (8.6) при $(\Phi_{\text{раб}} - \Phi_{\text{р макс ч}}) = 0$; для отстройки от коротких замыканий за трансформаторами ответвлений используется условие (8.3); для согласования с дистанционной защитой смежного участка выполняется условие $\underline{Z}_{с.з.А} = k_{\text{отс}} (\underline{Z}_{л} + \underline{Z}_{с.з.Б})$ при $k_{\text{отс}} = 0,85$.

Сопротивление уставки реле $\underline{Z}_{у}$ определяется как расчетное вторичное сопротивление: $\underline{Z}_{с.р} = (\bar{K}_i / K_U) \underline{Z}_{с.з.}$.

Выбор уставки времени срабатывания. Время срабатывания защиты $t_{с.з.}$ связано с сопротивлением $\underline{Z}_{з}$ на ее зажимах соотношением $t_{с.з.} = \alpha \underline{Z}_{з}$, где α — коэффициент наклона характеристики (рис. 8.7). Расчетная уставка защиты определяется как $t_{с.з.} = 0,9 \alpha \underline{Z}_{с.з.}$ [68]. Поэтому при выбранном $\underline{Z}_{с.з.}$ расчет $t_{с.з.}$ сводится к определению коэффициента α . При согласовании между собой дистанционных защит коэффициент $\alpha \geq (t_0 + \Delta t) / \underline{Z}_{л}$.

Таким образом, $t_{c.з} = 0,9 (Z_{c.з}/Z_{л}) (t_0 + \Delta t)$. Если принять $Z_{c.з}/Z_{л} = 1,5$, то $t_{c.з} = 1,35 (t_0 + \Delta t)$.

При определении коэффициента α в случае необходимости согласовывают характеристики защиты с защитными характеристиками предохранителей наиболее мощных трансформаторов ответственных подстанций. Кроме того, на смежных участках, расположенных как до, так и после рассматриваемой линии, могут быть токовые защиты с характеристиками, отличными от характеристики дистанционной защиты. Способ согласования характеристики дистанционной защиты с характеристиками предохранителей и максимальных токовых защит рассмотрен в [68].

Глава 9

ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ

§ 9.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ВИДЫ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ

Для защиты элементов электрических установок широко используется дифференциальный принцип, на котором осуществляются *продольные и поперечные дифференциальные защиты* с абсолютной селективностью. Продольные дифференциальные токовые защиты используются в основном для защиты элементов с сосредоточенными параметрами, например трансформаторов. Они могут применяться также для защиты линий небольшой длины. Поперечные дифференциальные защиты выполняются в виде дифференциальных токовой и токовой направленной, а также балансной защит. Они служат для защиты двух (и более) параллельных линий, а также для защиты от витковых замыканий обмотки статора синхронного генератора, имеющей параллельные ветви.

§ 9.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Продольная дифференциальная токовая защита основана на сравнении токов в начале и конце защищаемого элемента. Для выполнения защиты линии на ее концах устанавливаются измерительные трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации. Вторичные обмотки трансформаторов тока одноименных фаз и реле соединяются с помощью вспомогательных проводов так, чтобы при коротком замыкании вне защищаемой зоны, ограниченной измерительными трансформаторами, ток в реле отсутствовал, а при повреждении внутри зоны был равен току короткого замыкания.

Применяются две возможные схемы выполнения дифференциальной защиты — с циркулирующими токами и с уравновешенны-

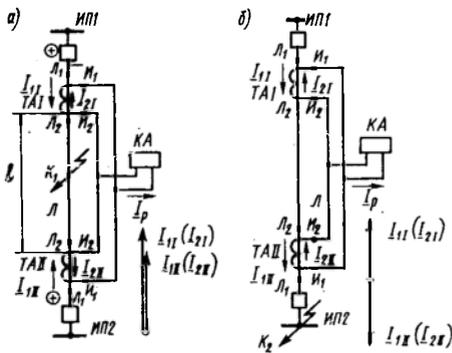


Рис. 9.1. Распределение токов в схеме продольной дифференциальной защиты с циркулирующими токами и их векторные диаграммы

ми напряжениями. В нашей стране используются преимущественно защиты, выполненные по схеме с циркулирующими токами (рис. 9.1). Схема получается путем параллельного соединения вторичных обмоток трансформаторов тока TAI , $TAII$ и реле тока KA . При этом ток в реле I_p определяется с учетом принятых условных положительных направлений токов I_{1I} и I_{1II} по концам защищаемой линии L .

С учетом положительных направлений, указанных на рис. 9.1, а, ток в реле равен

геометрической сумме вторичных токов:

$$I_p = I_{2I} + I_{2II}. \quad (9.1)$$

При коротком замыкании в защищаемой зоне L , ограниченной трансформаторами тока TAI и $TAII$ (точка K_1) токи I_{1I} и I_{1II} от источников питания направляются в точку повреждения, т. е. имеют положительное направление (рис. 9.1, а), вследствие чего токи I_{2I} и I_{2II} в реле в соответствии с выражением (9.1) складываются $I_p = I_{2I} + I_{2II} = I_{2K}$. При одностороннем питании один из токов, например I_{1II} , равен нулю, поэтому вторичный ток I_{2II} отсутствует. При этом ток I_{2I} не может замыкаться через вторичную обмотку трансформатора тока $TAII$, так как трансформатор тока работает, как указывалось (см. § 1.1), в режиме источника тока (сопротивление токовых цепей реле во много раз меньше внутреннего сопротивления трансформатора тока). Весь ток I_{2I} проходит через реле. Таким образом, при коротком замыкании в зоне ток в реле определяется током I_K в точке повреждения. При этом защита срабатывает, если $I_p \geq I_{c.p.}$ В нормальном режиме работы, при качаниях, а также при внешних коротких замыканиях (точка K_2) первичные токи I_{1I} и I_{1II} равны и сдвинуты по фазе на угол π . Если не считаться с погрешностями трансформаторов тока, то $I_{2I} = -I_{2II}$ (рис. 9.1, б), поэтому в соответствии с (9.1) ток в реле $I_p = 0$ и защита не срабатывает. Следовательно, продольная дифференциальная защита действует при повреждении в зоне и не реагирует на внешние короткие замыкания, токи качаний и токи нормальной работы, т. е. она обладает *абсолютной селективностью*. Эта принципиальная особенность дает возможность выполнить защиту без выдержки времени, а при выборе тока срабатывания не учитывать

токов качаний и нормального режима. В действительности трансформаторы тока имеют погрешности. Поэтому, несмотря на то что в указанных режимах первичные токи \underline{I}_{1I} и \underline{I}_{1II} равны и сдвинуты по фазе на угол π , вторичные токи \underline{I}_{2I} и \underline{I}_{2II} не одинаковы по абсолютному значению и сдвинуты по фазе на угол, отличной от π . В связи с этим в реле появляется ток, называемый *током небаланса* $I_{нб}$. Для исключения неправильной работы дифференциальной защиты ток срабатывания реле должен выбираться с учетом тока небаланса.

§ 9.3. ТОК НЕБАЛАНСА И ТОК СРАБАТЫВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ С ЦИРКУЛИРУЮЩИМИ ТОКАМИ

Из схем замещения измерительных трансформаторов тока (см. рис. 1.2) имеем

$$\underline{I}_{2I} = \underline{I}'_{1I} - \underline{I}'_{нам I}, \quad \underline{I}_{2II} = \underline{I}'_{1II} - \underline{I}'_{нам II}.$$

Поэтому при нормальной работе и внешних коротких замыканий ток в реле дифференциальной защиты

$$\underline{I}_p = \underline{I}_{нб} = \underline{I}_{2I} - \underline{I}_{2II} = \underline{I}'_{нам II} - \underline{I}'_{нам I}. \quad (9.2)$$

Таким образом, ток небаланса определяется токами намагничивания, которые для любых двух трансформаторов тока не одинаковы вследствие неидентичности их характеристик намагничивания (рис. 9.2, а). С увеличением первичного тока разница в токах намагничивания, а следовательно, и ток небаланса возрастают. Для выбора тока срабатывания защиты необходимо знать максимально возможное значение тока небаланса при внешних коротких замыканиях.

Определение тока небаланса расчетным путем представляет значительную трудность. Известные методы расчета максимального расчетного тока небаланса $I_{нб рсч}$ тах основаны на предварительном определении токов намагничивания [19]. Значительный ток намагничивания при переходных процессах во вторичных цепях трансформатора тока обусловлен наличием в токе к.з. плохо трансформируемой аperiodической составляющей (рис. 9.2, б, кривая 1). Она почти полностью замыкается через ветвь намагничивания, увеличивая этим ток намагничивания и насыщая сердечник трансформатора. Это ухудшает, в свою очередь, трансформацию периодической составляющей тока к. з., вследствие чего ток намагничивания еще более возрастает. Поэтому наибольшие токи небаланса в схеме дифференциальной защиты появляются в том случае, если повреждение возникает в момент, когда аperiodическая состав-

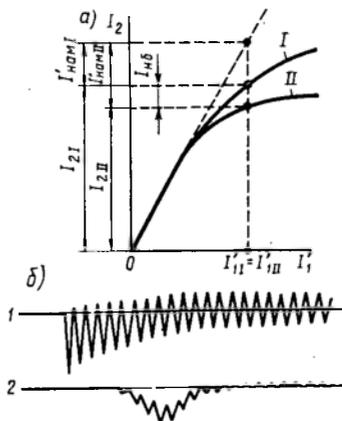


Рис. 9.2. Характеристики и ток намагничивания трансформаторов тока дифференциальной защиты

ляющая имеет наибольшее значение. Скорость изменения аperiodической составляющей зависит от постоянной времени T_1 первичной цепи. С увеличением T_1 продолжительность существования аperiodического тока возрастает. Это приводит к росту тока намагничивания. При повреждении в различных точках системы электроснабжения постоянная времени может изменяться в широких пределах, в среднем ее можно принять равной $T_1 = 0,01 \dots 0,1$ с.

Наряду с аperiodической составляющей на ток намагничивания влияют значение и знак остаточной индукции магнитопровода. При наличии остаточной индукции ток намагничивания в переходных процессах может сильно возрасти при совпадении остаточной индукции по знаку с индукцией, вызванной аperiodической составляющей тока к.з. Остаточная индукция уменьшается во времени очень медленно, поэтому при определении токов небаланса необходимо учитывать остаточную индукцию, которая может возникать в результате работы трубчатых разрядников, отключения короткого замыкания и т. п.

Расчеты, подтвержденные опытными данными, показывают, что при переходных процессах максимальные значения токов намагничивания и небаланса могут приближаться к амплитудным значениям тока к.з. и возникают спустя несколько периодов после начала короткого замыкания (рис. 9.2, б, кривая 2). Запаздывание объясняется возникновением переходного процесса в замкнутой вторичной цепи трансформаторов тока. Переходный процесс сопровождается появлением свободной аperiodической составляющей, которая затухает с постоянной времени T_2 вторичной цепи, превосходящей T_1 .

Для предотвращения неправильной работы дифференциальной защиты ток срабатывания реле следует выбирать с учетом тока небаланса переходного процесса по выражению

$$I_{с.р} = k_{отс} I_{нб.рсч \max} \quad (9.3)$$

При определении тока небаланса исходят из того, что трансформаторы тока в схеме выбраны так, что полная погрешность не превышает $\epsilon = 10\%$ при заданной вторичной нагрузке и предельной кратности тока к.з. (см. § 1.1). Погрешности двух трансформаторов тока имеют одинаковые знаки (рис. 9.2, а), поэтому ток небаланса, равный, согласно (9.2), разности токов намагничивания, определяется погрешностью, меньшей каждой из погрешностей в отдельности, что учитывается при расчетах коэффициентом однотипности $k_{одн} = 0,5 \dots 1,0$. Влияние аperiodической составляющей тока к.з. на ток небаланса учитывают коэффициентом $k_{ап}$; для момента времени $t = 0$ принимают $k_{ап} = 2,0$. Поэтому ток

$$I_{нб.рсч \max} = (\epsilon/100) k_{ап} k_{одн} I_{к.зн \max}^{(3)} / K_T \quad (9.4)$$

Чувствительность дифференциальной защиты при к.з. в защищаемой зоне оценивают коэффициентом чувствительности $k_{ч}$, для определения которого используют выражение (5.1). В зависимости от защищаемого элемента допускается иметь $k_{ч} = 1,5 \dots 2$. При использовании обычных реле тока чувствительность дифференциальной защиты обычно оказывается недостаточной. В связи с этим приходится принимать меры по повышению ее чувствительности.

§ 9.4. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ

Известно несколько способов повышения чувствительности защиты. Среди них отстройка от переходных токов небаланса по времени, включение последовательно с цепью тока измерительного реле тока добавочного сопротивления, использование аperiodических слагающих в переходном токе небаланса, применение реле с торможением.

Способ отстройки от переходных токов небаланса по времени не может считаться удовлетворительным, так как он не дает возможности в полной мере использовать принципиальное свойство дифференциальной защиты — ее быстроту действия.

Включение добавочных сопротивлений в цепь тока измерительных реле тока применяется сравнительно редко, например в дифференциальных защитах генераторов небольшой мощности.

Способ использования аperiodической слагающей в переходном токе небаланса. Этот способ реализован в реле РНТ с насыщающимся трансформатором тока (НТТ). Принцип работы НТТ и устройство реле РНТ рассмотрены выше (см. § 1.5 и 2.3). Здесь лишь напомним, что чувствительность реле РНТ зависит от формы кривой тока, проходящего в рабочей обмотке (см. рис. 2.10). При синусоидальном токе насыщающийся трансформатор не оказывает существенного влияния на работу реле. Если же в токе имеется аperiodическая составляющая, то магнитопровод НТТ сильно насыщается, сопротивление намагничивания резко падает, ток намагничивания увеличивается, а вторичный ток уменьшается. Коэффициент трансформации НТТ автоматически увеличивается, и чувствительность защиты уменьшается. Нормальная работа насыщающегося трансформатора восстанавливается, как только исчезает аperiodическая составляющая.

Таким образом, защита загружается на время существования переходного тока небаланса. Это дает возможность при определении тока небаланса не учитывать влияния аperiodической составляющей, а ток срабатывания реле отстраивать только от установившегося тока небаланса $I_{\text{пб рсч}}$, определяемого по выражению (9.4) при $k_{\text{ап}} = 1,0 \dots 1,3$.

Необходимо иметь в виду, что при к. з. в защищаемой зоне ток повреждения в общем случае также будет содержать аperiodическую составляющую. Однако это не ведет к отказу защиты, так как после исчезновения аperiodической составляющей нормальная работа НТТ восстанавливается и защита срабатывает. При этом она действует с замедлением, не превышающим длительности двух периодов, что не является большим недостатком.

Использование в дифференциальной защите реле с торможением. В дифференциальной защите токи небаланса могут быть значительными не только в переходном, но и в установившихся

режимах при отсутствии апериодической составляющей. В таких случаях реле РНТ оказывается непригодным для повышения чувствительности защиты. На рис. 9.3, а характеристика 3 отражает изменение расчетного тока небаланса в зависимости от приведенного тока внешнего короткого замыкания $I'_{к.вн}$. Для получения селективно действующей защиты необходимо использовать реле с током срабатывания, отстроенным от тока небаланса $I_{нб\text{ рсч}}$ при

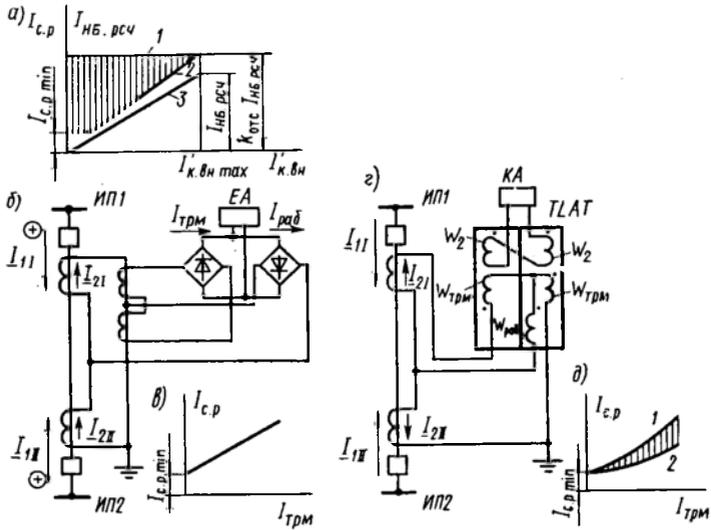


Рис. 9.3. Дифференциальная защита с торможением выпрямленным током (а, б, в) и с магнитным торможением (г, д)

максимально возможном токе внешнего к. з. $I'_{к.вн\text{ max}}$. При этом в случае использования обычного реле тока или реле РНТ характеристика их тока срабатывания, определяемая уставкой и не зависящая от $I'_{к.вн}$, изображается прямой 1, параллельной оси абсцисс.

Ток $I'_{к.вн}$ в зависимости от режима работы, места и вида короткого замыкания может быть меньшим тока $I'_{к.вн\text{ max}}$. При этом защита оказывается загрубленной. Ее чувствительность можно повысить, если вместе с изменением тока $I'_{к.вн}$ автоматически изменять в соответствии с характеристикой 2 ток срабатывания реле $I_{с.р}$, сохраняя при этом требуемую отстройку от соответствующих токов небаланса. Реле с такой характеристикой, как уже отмечалось, называется дифференциальным реле тока с торможением. Принцип действия одного из них рассмотрен выше (см. § 3.5). В схему дифференциальной защиты реле с торможением должно включаться так, чтобы при внешних к. з. обеспечивались пропор-

циональность тормозного тока $I_{\text{трм}}$ току $I'_{\text{к.вн}}$ и условие

$$I_{\text{с.р}} = I_{\text{с.р. min}} + k_{\text{трм}} I_{\text{трм}}$$

На рис. 9.3, б показана схема полупроводниковой защиты, удовлетворяющая указанным требованиям (рис. 9.3, в). В настоящее время находят применение дифференциальные реле тока с магнитным торможением типа ДЗТ (см. § 2.3), в которых тоже используются рассмотренные выше (см. § 1.5) промежуточные насыщающиеся трансформаторы тока $TLAT$, имеющие тормозные обмотки. Схема включения такого реле в цепи дифференциальной защиты показана на рис. 9.3, г. Секции тормозной обмотки $\omega_{\text{трм}}$ включены в плечи дифференциальной защиты, а первичная рабочая обмотка $\omega_{\text{раб}}$ включена дифференциально. При принятом условном положительном направлении токов I_{11} и I_{111} с учетом полярности обмоток ток в рабочей обмотке $\underline{I}_{\text{раб}} = \underline{I}_{21} + \underline{I}_{211}$, а тормозной ток $\underline{I}_{\text{трм}} = 0,5(\underline{I}_{21} - \underline{I}_{211})$. Насыщающийся трансформатор, как обычно, автоматически загроубляет защиту, когда в токе небаланса, проходящем по рабочей обмотке $\omega_{\text{раб}}$, имеется апериодическая составляющая. Наличие же тормозных обмоток позволяет отстраиваться от больших значений периодического тока небаланса. При нормальной работе и внешних коротких замыканиях тормозной ток наводит в магнитопроводе $TLAT$ магнитный поток, замыкающийся только по крайним стержням и насыщающий их.

Для исключения влияния на работу реле ЭДС, индуцированных этим потоком в секциях вторичной обмотки ω_2 , секции включены так, что ЭДС уравновешиваются. При этом магнитный поток от тока в рабочей обмотке $\omega_{\text{раб}}$ индуцирует в секциях обмотки ω_2 ЭДС, действующие согласно и возбуждающие ток в изм. ч. тельном реле тока KA . Таким образом, трансформаторная связь между обмотками $\omega_{\text{раб}}$ и ω_2 при нормальной работе и внешних к. з. зависит от степени насыщения магнитопровода $TLAT$. С увеличением тормозного тока степень насыщения возрастает и трансформация тока обмотки $\omega_{\text{раб}}$ в обмотку ω_2 ухудшается. Поэтому ток срабатывания защиты с ростом тормозного тока тоже увеличивается (рис. 9.3, д). Некоторой особенностью реле, как отмечалось (см. § 2.3), является зависимость коэффициента торможения $k_{\text{трм}}$ от угла ψ сдвига фаз между токами $\underline{I}_{\text{раб}}$ и $\underline{I}_{\text{трм}}$. Поэтому характеристика тока срабатывания реле располагается в некоторой зоне (заштрихована), ограниченной характеристиками 1 и 2 при $\psi = 0$ и $\psi = \pi/2$.

Наряду с реле типа ДЗТ промышленность выпускает дифференциальные токовые реле с торможением на современной микроэлектронной элементной базе. Одно из таких реле, используемое в комплектном устройстве ЯРЭ-2201, рассмотрено выше (см. § 3.5). Реле предназначено для защиты понижающих трансформаторов и высоковольтных электродвигателей. Его высокая чувстви-

тельность обеспечивается оригинальным способом отстройки от переходных токов небаланса (см. § 3.5).

§ 9.5. ПРОДОЛЬНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА ЛИНИЙ И ЕЕ ОСОБЕННОСТИ

Особенности продольной дифференциальной защиты линий обусловлены значительным расстоянием между концами защищаемой зоны. При этом между подстанциями *A* и *B* (рис. 9.4, *a*) прокладываются вспомогательные провода, необходимые для соединения трансформаторов тока *TAI* и *TAII*, расположенных на концах защищаемой линии. В схему защиты включаются два комплекта реле *KAI* и *KAIИ* по одному на каждом конце линии, необ-

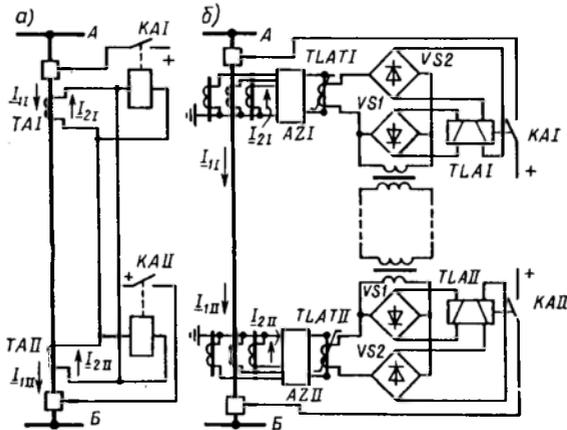


Рис. 9.4. Продольная дифференциальная защита линий

ходимые для отключения выключателей с обеих сторон. Выполнение указанных требований усложняет защиту, увеличивая затраты на ее осуществление, и отрицательно влияет на чувствительность и надежность.

Особенности защиты, обусловленные вспомогательными проводами. В схеме защиты с циркулирующими токами по вспомогательным проводам непрерывно проходят вторичные токи измерительных трансформаторов тока. Значения токов и сопротивления $Z_{\text{пр}}$ соединительных проводов определяют мощность, отдаваемую трансформаторами тока. При номинальном вторичном токе $I_{2\text{ном}} = 5$ А допустимая нагрузка трансформаторов тока ограничивает сопротивление соединительных проводов $Z_{\text{пр}} \leq 1..2$ Ом, поэтому продольную дифференциальную защиту при допустимом сечении проводов можно использовать на линии длиной лишь в несколько сотен метров.

При больших длинах линий снижение нагрузки на первичные измеритель-

ные трансформаторы тока достигается уменьшением тока во вспомогательных проводах вторичными (промежуточными) трансформаторами тока $TLA I$ и $TLA II$ (рис. 9.4, б) с коэффициентом трансформации $K_I > 1$. Указанный способ снижения нагрузки используется в типовых схемах продольных дифференциальных защит линий. Кроме того, в схемы защит включают промежуточные насыщающиеся трансформаторы $TLAT I$ и $TLAT II$, обеспечивающие уменьшение нагрузки на измерительные трансформаторы при токах к.з. за счет увеличения коэффициента трансформации при насыщении. В схеме применяют дифференциальные реле постоянного тока KAI и $KAI I$ с торможением выпрямленным током. При больших кратностях токов за счет насыщения магнитопроводов трансформаторов $TLAT$ защита практически сравнивает только фазы токов I_{II} и I_{III} (работает как дифференциально-фазная).

В качестве вспомогательных проводов желательно использовать существующие кабели телемеханики и связи. При этом исключается необходимость в прокладке специального кабеля для защиты, благодаря чему резко снижаются затраты на ее осуществление. В кабеле связи, если он проходит вдоль трассы защищаемой линии, при замыкании на землю в сети возникают ЭДС, которые могут представлять опасность для обслуживающего персонала и аппаратуры релейной защиты и автоматики. Эта опасность исключается благодаря применению трансформаторов TLA , отделяющих цепи реле от вспомогательных проводов.

Для осуществления защиты, действующей при всех видах коротких замыканий в зависимости от соотношений полных токов фаз на концах защищаемой линии, необходимо иметь шесть дифференциальных реле и не менее четырех вспомогательных проводов. При увеличении длины вспомогательных проводов повышается вероятность их повреждения, что приводит к отказу или неправильному действию защиты. Для уменьшения числа вспомогательных проводов и дифференциальных реле в схеме защиты используются комбинированные фильтры симметричных составляющих токов AZI и $AZII$, на выходе которых токи пропорциональны $I_1 + k_2 I_2$. Несколько худшие показатели защита имеет при фильтре $I_1 + k_0 I_0$, особенно пониженную чувствительность к двухфазным коротким замыканиям.

Применение комбинированных фильтров позволяет сократить число дифференциальных реле и число вспомогательных проводов до двух и тем самым снизить вероятность нарушения связи между трансформаторами тока. Для предотвращения ложных срабатываний и отказов при повреждении вспомогательных проводов защита снабжается специальными устройствами контроля их исправности.

Особенности защиты, обусловленные двумя комплектами дифференциальных реле. Вторичные токи I_{2I} и I_{2II} распределяются между параллельно включенными реле KAI и $KAI I$ (рис. 9.4, а). При этом для тока I_{2I} сопротивление вспомогательных проводов $Z_{пр}$ включается последовательно с сопротивлением реле $KAI I$, а для тока I_{2II} — последовательно с сопротивлением реле KAI . В связи с этим в первом реле проходит большая часть тока I_{2I} и меньшая часть тока I_{2II} , а во втором реле — наоборот, т. е. проходит меньшая часть тока I_{2I} и большая часть тока I_{2II} .

Таким образом, даже при отсутствии погрешностей трансформаторов тока в реле при нормальной работе и внешних коротких замыканиях проходят токи небаланса, обусловленные неодинаковым распределением вторичных токов между ними. С увеличением сопротивления вспомогательных проводов токи небаланса возрастают, что требует соответствующего заглубления защиты.

При коротких замыканиях в зоне ток в каждом реле составляет только часть полного тока повреждения, так как вторая его часть проходит по второму реле. В связи с этим чувствительность защиты понижается. Для повышения надежности и чувствительности защиты используют дифференциальные реле тока с торможением. Токи небаланса можно снизить с помощью добавочного сопротивления, компенсирующего влияние линии связи. Однако такая компенса-

ция не обеспечивает селективности защиты при значительной длине вспомогательных проводов.

Продольная дифференциальная защита линий типа ДЗЛ-2. В схеме защиты ДЗЛ-2 использован комбинированный фильтр, ток на выходе которого пропорционален $I_1 - k_2 I_2$. В качестве дифференциального реле применено поляризованное реле РП7 с двумя обмотками — рабочей и тормозной. Рабочая обмотка подключается к выпрямителю $VS1$, на вход которого подается напряжение, пропорциональное напряжению на вспомогательных проводах (рис. 9.4, б), а тормозная обмотка подключается к выпрямителю $VS2$, включенному на ток, пропорциональный току, циркулирующему по вспомогательным проводам. При токах $I_k \leq 2,5 I_{с.з}$ защита сравнивает абсолютные значения и фазы токов I_{I1} и I_{II1} , а при больших кратностях тока к. з. за счет насыщения \overline{TLAT} сравниваются, как указывалось, только фазы токов.

Защита имеет действующий автоматический контроль, выводящий ее из действия при повреждении вспомогательных проводов, а также автоматический и периодический контроль сопротивления изоляции вспомогательных проводов относительно земли. Защита типа ДЗЛ-2 предназначена для использования в качестве основной при всех видах короткого замыкания линии электропередачи протяженностью до 20 км (без ответвлений) в сетях с глухозаземленными нейтралью. Для использования защиты в сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралью производят соответствующие переключения цепей фильтра тока, обеспечивающие повышение чувствительности защиты и преимущественное отключение одной поврежденной линии при двойных замыканиях на землю [69]. Защиту ДЗЛ-2 используют также на блоках линия — трансформатор. В этом случае ее дополняют устройством блокировки от бросков тока намагничивания [70]. Исследовалась возможность использования продольных дифференциальных защит на линиях напряжением 6—10 кВ. Исследования завершились разработкой устройства защиты [70], которое не нашло массового применения.

Оценка продольной дифференциальной защиты линий. Такая защита не требует отстройки по току и времени от защит смежных участков, не реагирует на качания, обеспечивает селективное и без выдержки времени отключение поврежденного участка в сети любой конфигурации. Для участков небольшой длины защита получается сравнительно простой, достаточно надежной и удовлетворяющей требованиям чувствительности.

С увеличением длины защищаемой зоны защита приобретает отрицательные свойства, которые обусловлены влиянием на ее работу большой длины вспомогательных проводов: резко возрастает стоимость защиты в связи с большими затратами на соединительный кабель и его прокладку; увеличивается возможность

повреждения вспомогательных проводов и, как следствие, неправильная работа или отказ защиты. Поэтому возникает необходимость в специальном устройстве, контролирующем исправность вспомогательных проводов. Кроме того, появляется дополнительный ток небаланса, обусловленный неравным распределением вторичных токов между двумя реле, включенными на концах защищаемой линии; для повышения чувствительности защиты приходится использовать дифференциальные реле с торможением. Все это приводит к усложнению защиты.

Продольная дифференциальная защита по принципу действия не реагирует на внешние короткие замыкания, поэтому не может осуществлять резервирования при повреждении на смежных элементах. В связи с этим установка дифференциальной защиты в качестве единственной недопустима. Отмеченные недостатки ограничивают применение продольной дифференциальной защиты на линиях электропередачи. В распределительных сетях требуемая чувствительность, селективность и быстрота действия часто обеспечиваются более простыми токовыми и токовыми направленными защитами в сочетании со средствами автоматики.

§ 9.6. ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

Принцип действия защиты и выбор тока срабатывания. Эта защита основана на сравнении токов одноименных фаз параллельных цепей с мало отличающимися параметрами. Принцип действия ее рассматривается на примере выполнения защиты сдвоенной линии (рис. 9.5, а). Такие линии применяют в распределительных сетях напряжением 3—10 кВ, когда пропускная способность одной цепи оказывается недостаточной. Для осуществления защиты используют трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации, установленные со стороны питающих шин А. Реле тока КА включается на разность токов двух одноименных фаз сдвоенной линии по схеме с циркулирующими токами. При принятом условном положительном направлении токов от шин в линию ток в реле $I_{\Sigma} = I_{2I} - I_{2II}$. Поэтому,

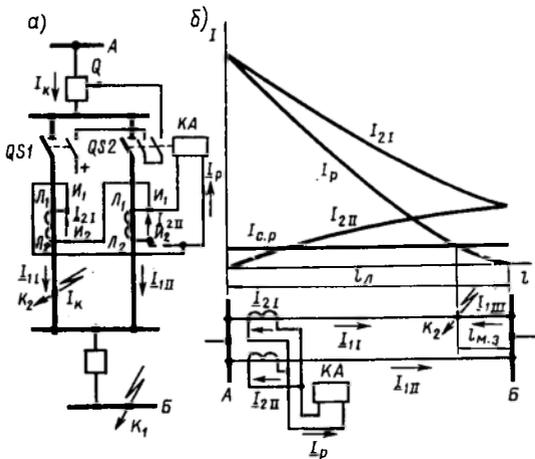


Рис. 9.5. Поперечная дифференциальная токовая защита сдвоенных линий

как и в продольной дифференциальной защите, при нормальной работе и внешних коротких замыканиях (за пределами сдвоенной линии в точке K_1) по обмотке реле проходит только ток небаланса.

Ток срабатывания реле тока выбирается по условию $I_{с.р} = k_{отс} I_{нб\text{ рсч макс}}$ при $k_{отс} = 1,3$. Максимальный расчетный ток небаланса для защиты линий с одинаковыми параметрами определяется по выражению (9.4), в котором вместо тока $I^{(3)}_{к.вн макс}$ принимается ток $I^{(3)}_{к.вн макс}/2$:

$$I_{нб\text{ рсч макс}} = 0,1 k_{одн} k_{ап} I^{(3)}_{к.вн макс} / (2K_I). \quad (9.5)$$

Учитывая изложенное о возможных погрешностях трансформаторов тока и о аperiodической составляющей, можно принять $k_{одн} k_{ап} = 1,0$.

При коротком замыкании на одной из линий, например в точке K_2 , равенство токов I_{2I} и I_{2II} нарушается, в реле появляется ток. Если $I_p = |I_{2I} - I_{2II}| \geq I_{с.р}$, то реле срабатывает и отключает выключатель Q линии.

Мертвая зона защиты. При удалении точки короткого замыкания K_2 от места установки защиты ток в поврежденной линии уменьшается, а в неповрежденной возрастает, вследствие чего ток I_p в реле уменьшается (рис. 9.5, б) так, что при повреждении вблизи шин противоположной подстанции он становится меньше тока срабатывания. При этом защита отказывает в действии. Длина участка $l_{м.з}$, при повреждении в пределах которого защита не работает из-за недостаточного тока в реле, называется *мертвой зоной поперечной дифференциальной токовой защиты*.

Для определения мертвой зоны $l_{м.з}$ токи I_{II} , I_{III} и I_{III} предполагаются совпадающими по фазе. При этом падения напряжения от шин подстанции A до точки K_2 одинаковы как вдоль одной, так и вдоль другой цепи, т. е.

$$I_{II} Z_{1уд} (l_l - l_{м.з}) = I_{III} Z_{1уд} l_l + I_{III} Z_{1уд} l_{м.з}.$$

После преобразования, учитывая, что $I_{II} + I_{III} = I_k$, а $I_{II} - I_{III} = I_{с.з}$, получаем

$$l_{м.з} = (I_{с.з} / I_k) l_l. \quad (9.6)$$

Согласно требованиям, длина мертвой зоны не должна превышать $l_{м.з} \leq 0,1 l_l$.

Оценка защиты. Защита по принципу действия не защищает сборки сдвоенной линии и шины подстанции, а в случае отключения одной из цепей должна выводиться из действия, так как ее ток срабатывания в общем случае оказывается не отстроенным от тока оставшейся в работе цепи и защита не имеет выдержки времени. Это, а также наличие мертвой зоны являются недостатком

защиты, исключаящим возможность ее применения в качестве единственной защиты сдвоенных линий.

Поперечная дифференциальная токовая защита не способна определить, на какой из параллельных цепей имеется повреждение, поэтому она не может быть использована для параллельных линий с выключателями на каждой из них, когда требуется и имеется возможность отключать только поврежденную линию. Такая возможность появляется и на сдвоенной линии, если разъединители в ее параллельных цепях снабжены приводами с дистанционным управлением. В этом случае действие защиты может быть согласовано с работой устройства АПВ линии. При повреждении любой параллельной цепи защита сначала отключает выключатель Q (рис. 9.5, а), после этого отключается разъединитель $QS1$ или $QS2$ поврежденной цепи, а затем выключатель включается [13].

§ 9.7. ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

Основные органы и принцип действия. Поперечная дифференциальная токовая защита приобретает способность определять поврежденную линию после включения в ее схему органа направления мощности. Таким образом, защита имеет два органа — измерительный орган тока (пусковой) и направления мощности (избирательный). Реле тока пускового органа, как и в дифференциальной токовой защите, срабатывает при коротких замыканиях на любой из защищаемых параллельных линий. Орган направления мощности позволяет защите определять поврежденную линию. В органе направления мощности используется, например, индукционное реле направления мощности двустороннего действия, обмотка тока которого включается последовательно с обмоткой реле тока на разность токов одноименных фаз параллельных линий, а к обмотке напряжения подводится напряжение шин, обычно соответствующее 90-градусной схеме включения реле. Защита устанавливается с обеих сторон двух параллельных линий, присоединенных к шинам через отдельные выключатели (рис. 9.6, а).

Из рассмотренных векторных диаграмм токов и напряжений (рис. 9.6, б, в) следует, что при коротких замыканиях на защищаемых линиях реле направления мощности четко определяют поврежденную линию. Так, при повреждении линии $L1$ в точке K_1 оба реле направления мощности $KW1$ и $KW2$ имеют положительные вращающие моменты (рис. 9.6, б), под действием которых они замыкают контакты в цепях промежуточных реле $KL1$ и $KL3$, действующих с двух сторон на отключение линии $L1$.

При повреждении линии $L2$ в точке K_2 углы между токами и напряжениями, подводимыми к реле, изменяются на угол π (рис. 9.6, в), вследствие чего оба реле мощности под действием отрица-

гельных вращающих моментов замыкают контакты в цепях промежуточных реле $KL2$ и $KL4$, действующих с двух сторон на отключение линии $Л2$. При наличии источников питания с двух сторон защищаемой линии поведение реле аналогично.

Зона каскадного действия и мертвая зона защиты. Пусковые органы защиты, как и реле тока поперечной дифференциальной токовой защиты (см. § 9.6), не срабатывают из-за малых токов в их обмотках при коротких замыканиях у шин противоположной подстанции. Так, если точка K_1 расположена у шин подстанции

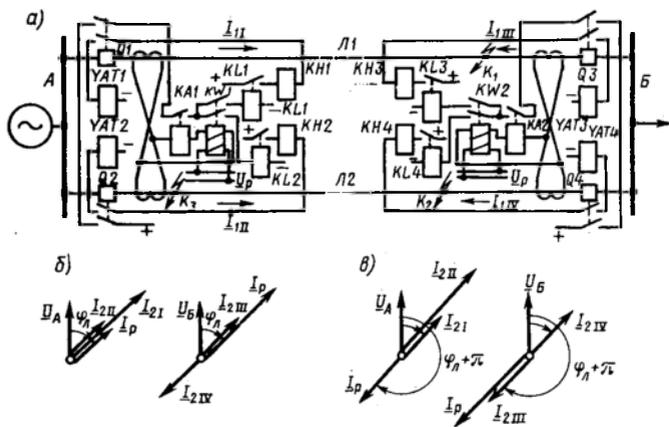


Рис. 9.6. Поперечная дифференциальная токовая направленная защита

B , то не срабатывает реле пускового органа защиты подстанции A . Однако при этом, как следует из векторных диаграмм (рис. 9.6, б), достаточным для срабатывания оказывается ток в реле пускового органа защиты подстанции B . Эта защита отключает выключатель $Q3$. После этого весь ток в точку K_1 от подстанции A идет только по поврежденной линии $Л1$, благодаря чему пусковой орган срабатывает и защита подстанции A отключает выключатель $Q1$. Таким образом, происходит поочередное (каскадное) отключение выключателей поврежденной линии. Для расчета зоны каскадного действия используют выражение

$$l_{к.д} = (I_{с.з} / I_K) l_{д}, \quad (9.7)$$

аналогичное (9.6).

Поперечная дифференциальная токовая направленная защита, как и любая дифференциальная защита, является быстродействующей, однако наличие зоны каскадного действия увеличивает время отключения поврежденной линии примерно в два раза (при повреждении в указанной зоне). Зона каскадного действия для

каждого комплекта защиты не должна превышать $I_{к.д} \leq 0,25I_{л}$ длины защищаемой линии. Орган направления мощности также имеет зону каскадного действия. Она обычно меньше зоны каскадного действия пускового органа и поэтому на работу защиты влияния не оказывает.

Кроме зоны каскадного действия реле направления мощности, как и в схеме токовой направленной защиты, имеет мертвую зону $l_{м.з}$ по напряжению, т. е. отказывает в действии вследствие недостаточного напряжения, подводимого к нему при металлических трехфазных коротких замыканиях у места установки защиты. Как указывалось, мертвая зона не должна превышать $l_{м.з} \leq 0,1l_{л}$ длины линии. В действительности для существующих реле направления мощности она значительно меньше. Наличие мертвой зоны обуславливает возможность отказа поперечной дифференциальной токовой направленной защиты с двух сторон защищаемой линии в случае трехфазного короткого замыкания в этой зоне. Это объясняется тем, что мертвая зона данного комплекта защиты располагается в зоне каскадного действия защиты противоположного конца линий.

Известны способы ликвидации мертвых зон. Один из них состоит в выполнении цепей напряжения реле направления мощности в виде резонансного контура, настроенного на промышленную частоту (реле обладает так называемой «памятью»). Однако разработанная схема поперечной дифференциальной направленной защиты с таким органом направления мощности применения не получила. При втором способе используются принципиальные особенности поперечных дифференциальных токовых направленных защит, позволяющие применять реле направления мощности с вращающим моментом вида [71]

$$M_{вр} = (I_{21} - I_{211}) [U_p + k(I_{21} + I_{211})] \cos(\varphi_p + \alpha). \quad (9.8)$$

Коэффициент k выбирается так, чтобы при повреждении в мертвой зоне к обмотке напряжения реле подводилось напряжение, достаточное для срабатывания. Однако для защиты, установленной на приемной подстанции, составляющая напряжения $k(I_{21} + I_{211})$ при повреждении на любой линии в любой точке равна нулю и мертвая зона не устраняется.

Мертвая зона $l_{м.з}$, как правило, весьма мала, мала и вероятность возникновения трехфазных металлических коротких замыканий в этой зоне. Учитывая это, а также наличие на линиях токовых отсечек без выдержек времени от многофазных коротких замыканий, никаких мер, направленных на устранение мертвой зоны поперечной дифференциальной направленной защиты, обычно не предусматривают.

Цепи оперативного тока защиты. Поперечная дифференциальная направленная защита при отключении одной из линий теряет способность работать селективно, поэтому одновременно с отключением линии защита автоматически выводится из действия. Это обеспечивается подведением оперативного тока к защите через последовательно включенные вспомогательные контакты выключателей $Q1$ и $Q2$ (рис. 9.6, а). При отключении одного из них со-

ответствующий вспомогательный контакт размыкается и защита выводится из действия. Аналогичным образом используются вспомогательные контакты выключателей $Q3$ и $Q4$.

Такое выполнение цепей оперативного тока исключает также возможность неправильной работы защиты в режиме каскадного отключения, например короткого замыкания на линии $L2$ в зоне

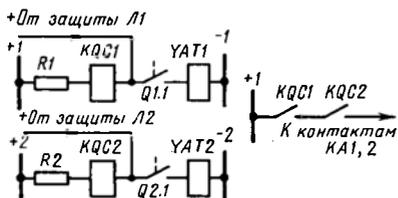


Рис. 9.7. Схема блокировки защиты при отключении одной из параллельных линий

каскадного действия защиты подстанции B (точка K_3). Первым отключается выключатель $Q2$, при этом оперативный ток с защиты снимается. После отключения выключателя $Q2$ весь ток к. з. направляется от шин подстанции A через неповрежденную линию $L1$. При этом пусковой орган продолжает оставаться в состоянии после срабатывания, а орган направления мощности замыкает контакт в цепи отключения выключателя $Q1$. Отсутствие оперативного тока предотвращает неправильное отключение этого выключателя. Следует иметь в виду, что в режиме каскадного действия защита срабатывает правильно только в том случае, если вспомогательные контакты размыкают цепь оперативного тока с некоторым опережением относительно размыкания главных контактов выключателей, что не всегда достигается. Схема блокировки получается более надежной, если к защите подвести оперативный ток через последовательно включенные контакты реле $KQC1$, $KQC2$ включенного положения выключателей $Q1$, $Q2$ (рис. 9.7). Обмотки указанных реле включаются последовательно со вспомогательными контактами $Q1.1$, $Q2.1$ в цепях электромагнитов $YAT1$, $YAT2$ отключения выключателей. Реле положения возвращается и размыкает контакт, выводя защиту из действия сразу же при подаче плюса оперативного тока от защиты на соответствующий электромагнит отключения.

§ 9.8. ПУСКОВЫЕ ОРГАНЫ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ

Пусковой орган защиты служит для пуска ее в действие только при возникновении повреждения на одной из защищаемых линий. Для обеспечения этого параметр срабатывания пускового органа выбирается исходя из следующих требований: пусковой орган не должен срабатывать при внешних коротких замыканиях; он не должен срабатывать от тока нагрузки при нормальной работе только одной линии, что необходимо для предотвращения срабатывания защиты при отключении параллельной линии с противоположной стороны; пусковой орган, включенный на ток

неповрежденной фазы, не должен срабатывать при каскадном отключении коротких замыканий на землю в сетях с глухозаземленными нейтральными.

Пусковой орган тока. В пусковом органе используются максимальные реле тока, включаемые на разности токов одноименных фаз параллельных линий. Ток срабатывания реле в соответствии с указанными требованиями выбирается наибольшим из следующих трех условий:

$$\left. \begin{aligned} I_{с.р} &\geq k_{отс} I_{нб.рсч\max}; \\ I_{с.р} &\geq k_{отс} I_{раб\max} / (k_{в} K_I); \\ I_{с.р} &\geq k_{отс} I_{нп\max} / K_I. \end{aligned} \right\} \quad (9.9)$$

Выражения (9.9) справедливы при коэффициенте $k_{сх}=1$, при котором $I_{с.з}=K_I I_{с.р}$. В первом выражении ток $I_{нб\рсч\max}$ является максимальным расчетным током небаланса переходного процесса короткого замыкания вне параллельных линий. Для линий с одинаковыми параметрами он определяется из выражения (9.5). Для линий с разными сопротивлениями в токе небаланса появляется дополнительная слагающая.

При определении тока срабатывания по второму выражению (9.9) учитывается коэффициент возврата $k_{в}$, иначе защита может работать неправильно при включении в работу второй параллельной линии. Ток $I_{раб\max}$ является максимально возможным рабочим током при работе только одной линии.

Защита может неправильно подействовать и в случае неучета тока $I_{нп\max}$, который возникает в неповрежденных фазах параллельных линий, например при коротком замыкании на землю одной из них. В режиме каскадного отключения повреждения исчезает ток $I_{нп\max}$ в поврежденной линии в связи с отключением выключателя с одного ее конца. Это и может явиться причиной неправильной работы защиты, если не будет выполнено третье условие (9.9). Однако если третье условие оказывается определяющим при выборе тока срабатывания, то целесообразно комплект защиты от многофазных коротких замыканий выводить из действия при коротких замыканиях на землю. При этом определяющим при выборе тока срабатывания пускового органа обычно является второе условие (9.9).

Комбинированный пуск по току и напряжению. Если расчет показывает, что зона каскадного действия для пускового органа тока недопустимо велика и коэффициенты чувствительности ниже требуемых, то применяют комбинированный пусковой орган, схема для одной фазы которого приведена на рис. 9.8, а. Так как защита может подействовать лишь при одновременном срабатывании максимального реле тока KA и минимального реле напряжения KV , ток срабатывания реле тока выбирается с учетом пер-

вого условия (9.9), а возможная неправильная работа защиты при отключении одной из линий не допускается благодаря тому, что напряжение срабатывания реле напряжения выбирается с учетом требования

$$U_{с.р} \leq U_{раб\ min} / (k_{отс} k_{в} K_U). \quad (9.10)$$

Для получения равной чувствительности по напряжению пускового органа при всех видах двухфазных коротких замыканий схема должна иметь три реле напряжения, включенных на междуфазные напряжения. Расчеты показывают, что при имеющихся

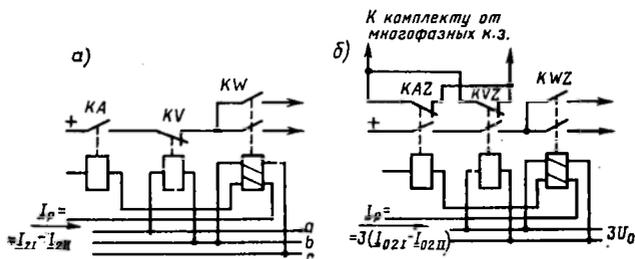


Рис. 9.8. Схемы пусковых органов защиты

значениях сопротивления системы и сопротивления линии чувствительность защиты определяет реле напряжения [60].

Пусковой орган тока нулевой последовательности. В сетях с глухозаземленными нейтралью пусковые органы, реагирующие на полные токи и напряжения фаз, в некоторых случаях не обеспечивают требуемой чувствительности защиты при однофазных коротких замыканиях на землю. При этом более чувствительным оказывается пусковой орган тока нулевой последовательности, реле KAZ которого включается на разность токов нулевой последовательности параллельных линий (рис. 9.8, б). Если разновременность отключения фаз выключателей меньше времени действия защиты, то ток срабатывания пускового органа можно отстраивать только от максимального расчетного тока небаланса при внешних коротких замыканиях на землю. При этом не исключена возможность срабатывания реле тока нулевой последовательности при трехфазных и двухфазных коротких замыканиях вблизи места установки защиты, при которых токи небаланса могут иметь максимальное значение. Это необходимо иметь в виду, если при срабатывании пускового органа тока нулевой последовательности комплект защиты от многофазных коротких замыканий выводится из действия. Загрублять пусковой орган нулевой последовательности в таких случаях нецелесообразно. Для исключения неправильной работы пусковой орган дополняется реле напряжения нулевой последовательности KVZ. Осуществлять пуск

защиты при коротких замыканиях на землю только с помощью одного реле напряжения нулевой последовательности нельзя, так как при внешних коротких замыканиях на землю защита может срабатывать излишне.

Для комплекта защиты от коротких замыканий на землю обычно используется отдельный орган направления мощности нулевой последовательности KWZ (рис. 9.8, б). При этом поперечная дифференциальная токовая направленная защита состоит из двух комплектов: комплекта от многофазных коротких замыканий и комплекта нулевой последовательности от коротких замыканий на землю.

Чувствительность защиты. Чувствительность поперечных дифференциальных защит оценивается коэффициентом чувствительности, определяемым в двух режимах: до отключения выключателей поврежденной линии и после отключения поврежденной линии с одной стороны при каскадном действии защиты. В первом случае коэффициент чувствительности одной из защит должен быть $k'_ч = I_3 / I_{c.3} \geq 2$; здесь $I_3 = I_{II} - I_{III}$ — разность токов одноименных фаз параллельных линий. Проверку рекомендуется проводить для той точки короткого замыкания, для которой чувствительности защит обеих сторон линий одинаковы. Расстояние до этой точки, например от шин подстанции A (см. рис. 9.6, а), определяется как [10]

$$l_{p.ч} = [I_{c.32} / (I_{c.31} + I_{c.32})] l,$$

где $I_{c.31}$ — ток срабатывания защиты, установленной на подстанции A ; $I_{c.32}$ — ток срабатывания защиты, установленной на подстанции B . Во втором случае рассматривается короткое замыкание в зоне каскадного действия после отключения выключателя у места повреждения, при этом коэффициент чувствительности должен быть $k''_ч = I_k / I_{c.3} \geq 1,5$; здесь $I_k = I_3$ — полный ток в точке повреждения после отключения поврежденной линии с одной стороны.

Случаи неправильной работы защиты. При типовом исполнении и рассмотренных условиях выбора параметров срабатывания поперечная дифференциальная токовая направленная защита обладает тем недостатком, что при повреждениях на защищаемых линиях, сопровождающихся обрывами проводов с односторонним коротким замыканием на землю, отключает обе линии (рис. 9.9, а). При этом неправильно действует защита со стороны обрыва (со стороны подстанции A). В общем случае так ведут себя и комплект от многофазных повреждений, и комплект от коротких замыканий на землю. В свое время были предложены меры [72, 73], устраняющие этот недостаток. В частности, показано [73], что комплект от замыкания на землю может действовать правильно при обрывах проводов с односторонним замыканием их на

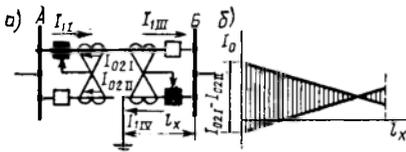


Рис. 9.9. Схема и графики для анализа поведения поперечной дифференциальной токовой направленной защиты при обрыве линии с одно-сторонним коротким замыканием

стороны обрыва, имеет максимальное значение при коротком замыкании у шин противоположной подстанции. Выбирая ток срабатывания больше указанного максимального тока, можно исключить неправильную работу комплекта от замыканий на землю. В некоторых случаях такая защита не обеспечивает требуемой чувствительности, при этом возникает необходимость дополнять пусковой орган тока нулевой последовательности более чувствительным реле тока, действующим с выдержкой времени второй ступени.

Наряду с этим имеется ряд схем, основанных на том, что между моментом разрыва провода и возникновением короткого замыкания проходит некоторое время, необходимое для падения оборванного провода на землю [73]. Однако указанные меры усложняют защиту, поэтому их рекомендуют только в некоторых особых случаях.

В сетях с изолированными нейтральными в режиме каскадного действия поперечная дифференциальная токовая направленная защита может отключить обе линии при двойных замыканиях на землю, когда второе место повреждения находится вне защищаемых линий.

§ 9.9. ВЫПОЛНЕНИЕ И ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ

Поперечные дифференциальные токовые направленные защиты выполняются на основе общих положений, изложенных выше (см. гл. 5 и § 9.7).

Для примера рассмотрим одну из них.

Защита на переменном оперативном токе для сетей с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтральными. Пусковым органом защиты выполняется на электромагнитных реле тока $KA1$ и $KA2$ типа РТ-40, включенных на разности токов одноименных фаз (фазы A — трансформаторы тока $TA1I$ и $TA1II$, фазы C — трансформаторы тока $TA12$ и $TA112$) параллельных линий (рис. 9.10, a , b , $в$). В качестве избирательных органов использованы реле направления мощности $KW1$ и $KW2$ двустороннего действия типа РЕМ. Реле включаются по 90-градусной схеме на разности токов одноименных фаз (A и C) параллельных линий и соответствующие междуфазные напряжения. В схеме защиты предусматривается пофазный пуск реле направления мощности. Это исключает возможность неправильной работы защиты при двухфазных коротких замыканиях, при которых реле направления мощности, включенное на

землю, если определенным образом выбрать ток срабатывания пускового органа тока нулевой последовательности. При этом комплект от замыканий между фазами выводится из действия.

На рис. 9.9, б показано примерное распределение токов нулевой последовательности по линиям в зависимости от места замыкания оборванного провода. Из этого распределения следует, что ток $I_p = I_{02 I} - I_{02 II}$ в реле нулевой последовательности, установленного со

ток неповрежденной фазы, может подействовать на отключение неповрежденной линии под влиянием тока небаланса и при каскадном отключении короткого замыкания под влиянием тока в неповрежденной фазе.

Защита выполнена по схеме с дешунтированием электромагнитов отключения выключателей. Для этой цели используются промежуточные реле $KL1$ — $KL4$ типа РП-341. Реле $KL1$ и $KL2$ включаются в цепи трансформаторов тока $TA11$, $TA12$ и при срабатывании отключают линию $Л1$, а реле $KL3$ и $KL4$ включаются в цепи трансформаторов тока $TA111$ и $TA112$ и действуют на отключение линии $Л2$. Эти реле управляются замыкающими контактами реле $KA1$ и

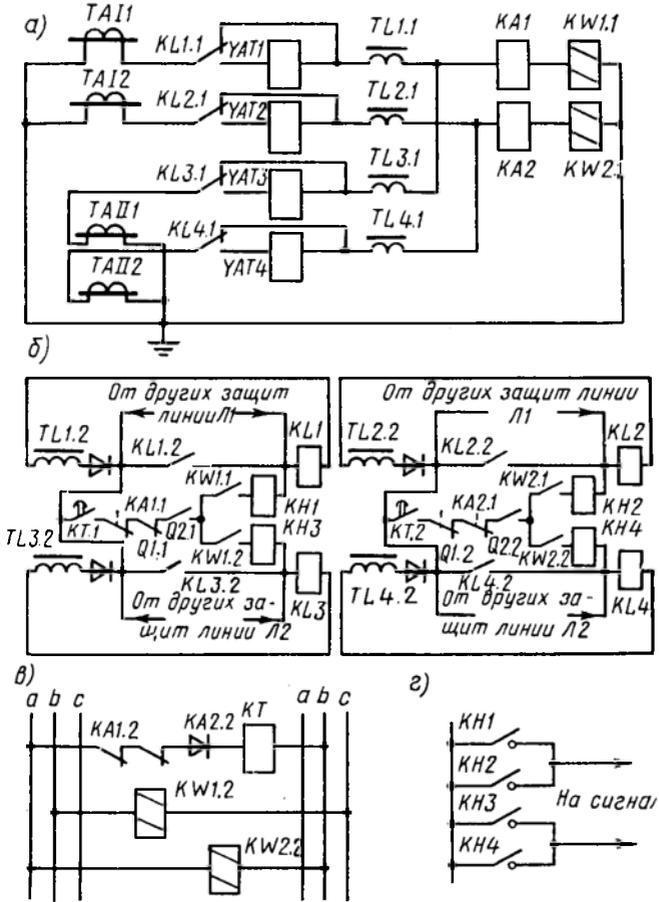


Рис. 9.10. Принципиальная схема двухфазной поперечной дифференциальной токовой направленной защиты параллельных линий, выполненной на оперативном перемном токе

$KA2$ пускового органа, реле $KW1$ и $KW2$ органа направления мощности и реле времени KT , которое вводит в действие защиты замедление около $t_{с.з.} = 0,1$ с для отстройки защиты от работы разрядников. В цепи управления включены

последовательно соединенные вспомогательные контакты выключателей $Q1, Q2$, разрывающие цепь при отключении одного из выключателей. Для фиксации срабатывания защиты предусматриваются указательные реле $KN1 — KN4$.

Оценка и область использования. Поперечная дифференциальная токовая направленная защита сравнительно проста. Ее положительными качествами являются также быстродействие, нереагирование на качания и, как правило, достаточно высокая чувствительность. Однако защита имеет ряд недостатков. Прежде всего это наличие мертвой зоны по напряжению и зоны каскадного действия. Принципиальным недостатком защиты является возможность неправильного действия, сопровождающегося отключением обеих линий при обрыве проводов одной из защищаемых линий с односторонним коротким замыканием. Устранение этого недостатка связано с усложнением защиты и, как правило, не выполняется.

В сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтралью в режиме каскадного действия защита может отключать обе линии при двойном замыкании на землю, когда одно место повреждения находится на одной из параллельных линий, а другое — вне их. Поперечная дифференциальная токовая направленная защита по принципу действия является защитой двух параллельно работающих линий, а при отключении одной из них защита автоматически выводится из действия, поэтому наряду с поперечной дифференциальной защитой на линиях должна предусматриваться дополнительная защита, которая также является резервной к защитам смежных элементов.

Опыт эксплуатации поперечной дифференциальной токовой направленной защиты показывает, что ряд из отмеченных недостатков проявляются очень редко. Поэтому эти защиты широко используются в качестве основных защит линий в сетях напряжением до 35 кВ.

§ 9.10. БАЛАНСНАЯ ЗАЩИТА

Принцип действия. Балансная защита сравнивает абсолютные значения токов одноименных фаз параллельных линий. Защита действует на отключение той линии, абсолютное значение тока в которой больше. В связи с этим она не имеет мертвой зоны. На линиях с односторонним питанием ее можно устанавливать только со стороны источника питания. Широкого применения в нашей стране балансная защита не находит.

Балансная защита двух параллельных линий. Характеристика балансных токовых реле идентична характеристике реле с торможением (см. § 3.5 и 9.4). Ток одной из линий является рабочим током реле $I_{\text{раб}}(I_{\text{с.р}})$, а ток другой линии — тормозным током $I_{\text{трм}}$. Для выполнения защиты необходимо иметь два реле на фазу,

Балансная защита трех параллельных линий. Участки с тремя параллельными линиями (рис. 9.11) обычно встречаются в распределительных сетях напряжением до 35 кВ. На таких линиях можно использовать поперечные дифференциальные защиты, в частности защиты балансного типа, которые должны выполняться с учетом следующих требований: защита должна быть селективной при работе трех и любых двух параллельных линий при равной чувствительности и надежности (по сравнению с защитой двух параллельных линий); при отключении или включении линий в цепях тока защиты не должно производиться никаких переключений.

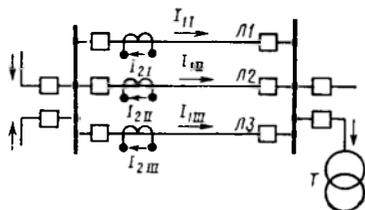


Рис. 9.11. Схема трех параллельных линий и распределение токов

Указанным требованиям удовлетворяет защита, выполненная посредством реле, вращающий момент которого определяется следующим выражением [74]:

$$M_{\text{вр}} = I_{21}^2 - k_{\text{трм1}}^2 I_{211} I_{2111} - k_{\text{трм2}}^2 (I_{211} - I_{2111})^2 - I_{\text{с.р. min}}^2, \quad (9.11)$$

где I_{21} , I_{211} , I_{2111} — вторичные токи одноименных фаз соответственно линий Л1 — Л3; $k_{\text{трм}}$ — коэффициенты торможения; $I_{\text{с.р. min}}$ — минимальный ток срабатывания реле при отсутствии торможения.

При нормальной работе, внешних коротких замыканиях, а также при повреждении защищаемой линии Л1 токи I_{211} и I_{2111} равны между собой и совпадают по фазе, поэтому выражение (9.11) для этих случаев принимает вид

$$M_{\text{вр}} = I_{21}^2 - k_{\text{трм1}}^2 I_{211}^2 - I_{\text{с.р. min}}^2. \quad (9.12)$$

При отключении одной из линий, например Л3, в выражении (9.11) исчезает второе слагаемое, в связи с чем результирующий вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = I_{21}^2 - k_{\text{трм2}}^2 I_{211}^2 - I_{\text{с.р. min}}^2. \quad (9.13)$$

Аналогичное выражение получается и для момента при отключении линии Л2.

Таким образом, вращающие моменты реле при работе трех и двух параллельных линий имеют одинаковые выражения. Поэтому принципиально возможно выполнить реле, обладающее равной чувствительностью и надежностью при работе трех и двух параллельных линий. Равная надежность получается при $k_{\text{трм1}} = k_{\text{трм2}}$ [74]. При этом коэффициент торможения можно принять равным $k_{\text{трм}} = 1,14$. Исходя из этого, выражению (9.11) после преобразования можно придать следующий вид:

$$M_{\text{вр}} = I_{21}^2 - (I_{211} - I_{2111})^2 - 0,325 (I_{211} + I_{2111})^2 - I_{\text{с.р. min}}^2.$$

Если принять

$$(I_{211} - I_{2111}) = I_{\delta}, \quad (I_{211} + I_{2111}) = I_{\gamma},$$

то окончательно

$$M_{\text{вр}} = I_{21}^2 - I_{\delta}^2 - 0,325 I_{\gamma}^2 - I_{\text{с.р. min}}^2. \quad (9.14)$$

Из выражения (9.14) следует, что на реле необходимо создать рабочий момент, пропорциональный I_{21}^2 , и два независимых тормозных момента, один из которых пропорционален I_{δ}^2 , а другой — $0,325 I_{\gamma}^2$. Момент, пропорциональный $I_{\text{с.р. min}}^2$, создается возвратной пружиной. Таким образом, рассмотренное реле является измерительным органом с тремя электрическими величинами.

УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**§ 10.1. НАЗНАЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ,
ТРЕБОВАНИЯ К НИМ И РАСЧЕТ ИХ ПАРАМЕТРОВ**

Назначение устройств АПВ. Большинство повреждений воздушных линий электропередачи возникает в результате схлестывания проводов при сильном ветре и гололеде, нарушения изоляции во время грозы, падения деревьев, набросов, замыкания проводов движущимися механизмами и т. п. Эти повреждения неустойчивы и при быстром отключении поврежденной линии устраняются. В этом случае при повторном включении линии она остается в работе и электроснабжение потребителей не прекращается. Повторное включение осуществляется автоматически устройством автоматического повторного включения (УАПВ). При устойчивых повреждениях защита снова отключает линию после действия УАПВ, т. е. происходит неуспешное АПВ. По статистическим данным, УАПВ в системах электроснабжения нашей страны имеют в среднем 60—75% успешных действий. Такая эффективность УАПВ делает их одним из основных средств повышения надежности электроснабжения. Согласно [3], устройствами АПВ должны оборудоваться воздушные и смешанные кабельно-воздушные линии всех типов напряжением выше 1 кВ при наличии на них соответствующих коммутационных аппаратов. В эксплуатации применяются устройства АПВ, различающиеся по следующим основным признакам: по числу фаз выключателей, включаемых устройством АПВ,— трехфазное (ТАПВ) и однофазное (ОАПВ); по способу проверки синхронизма при АПВ — для линий с двусторонним питанием; по способу воздействия на привод выключателя — механические и электрические устройства АПВ; по кратности действия — АПВ однократного и многократного действия.

Схемы УАПВ различаются также по способу пуска, по способу возврата в положение готовности к действию, по типу элементов схемы электроснабжения, оборудованных устройством АПВ.

Требования к УАПВ и расчет их параметров. Несмотря на указанные различия, все устройства АПВ должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Они должны находиться в состоянии постоянной готовности к действию и срабатывать при всех случаях аварийного отключения выключателя, кроме случаев отключения выключателя релейной защитой после включения его дежурным персоналом; не должны приходить в действие при оперативных отключениях выключателя дежурным персоналом, что обеспечивается пуском уст-

ройств АПВ от несоответствия положений выключателя и его ключа управления, которое возникает всегда при любом автоматическом отключении выключателя. В эксплуатации используется также пуск устройства АПВ при срабатывании релейной защиты. Однако такой пуск не обеспечивает действия АПВ при аварийных отключениях, не сопровождающихся срабатыванием релейной защиты, поэтому его рекомендуется применять лишь в некоторых частных случаях. Схемы АПВ должны допускать возможность автоматического вывода их из действия при срабатывании тех или иных защит.

2. Устройства АПВ должны иметь минимально возможное время срабатывания $t_{АПВ1}$ для того, чтобы сократить продолжительность перерыва питания потребителей. Практически можно выполнить АПВ действующим без замедления. Однако эта возможность ограничивается рядом условий. Для успешного действия АПВ необходимо, чтобы время срабатывания $t_{АПВ1}$ было больше: времени $t_{г.п.}$, необходимого для восстановления готовности привода к работе на включение (для применяемых типов приводов с учетом условий их работы $t_{г.п.} \approx 0,1 \dots 0,3$ с); времени $t_{д.с.}$, необходимого для деионизации среды в точке повреждения (для установок напряжением до 220 кВ $t_{д.с.} \approx 0,2$ с); времени готовности выключателя $t_{г.в.}$, необходимого для восстановления отключающей способности выключателя после отключения им тока к.з. Для однократного АПВ время $t_{г.в.}$ всегда меньше суммы времени $t_{г.п.}$ и времени включения выключателя $t_{вв.}$. Поэтому определяющим обычно является условие $t_{АПВ1} > t_{г.п.}$. При этом с учетом времени запаса $t_{зап} = 0,4 \dots 0,5$ с время срабатывания УАПВ для линий с однофазным питанием

$$t_{АПВ1} \geq t_{г.п.} + t_{зап} = 0,5 \dots 0,8 \text{ с.} \quad (10.1)$$

В отдельных случаях для воздушных линий, когда велика вероятность их повреждения при падении деревьев и по другим аналогичным причинам, для эффективности АПВ его выдержку времени целесообразно принимать несколько повышенной — около нескольких секунд. В этом случае также уменьшается вероятность неселективного перегорания предохранителей при неуспешном АПВ, установленных на элементах систем электроснабжения, расположенных ближе к источнику питания, чем рассматриваемый выключатель с устройством АПВ. Схема УАПВ во всех случаях должна быть выполнена так, чтобы продолжительность воздействия на включение выключателя была достаточной. Реле времени, используемое в схемах УАПВ для создания выдержки времени $t_{АПВ1}$, имеет погрешности, зависящие от температуры среды. В [75] дан расчет $t_{АПВ1}$ с учетом этих погрешностей.

3. Автоматически с заданной выдержкой времени устройства АПВ должны возвращаться в состояние готовности к новому действию после включения в работу выключателя. При выборе вы-

держки времени $t_{\text{АПВ2}}$ на возврат устройства АПВ в состояние готовности к действию должны выполняться следующие требования:

устройство не должно производить многократные включения выключателя на неустранившееся короткое замыкание, что обеспечивается при условии, если релейная защита с максимальной выдержкой времени $t_{\text{с.з max}}$ успеет отключить выключатель, включенный на короткое замыкание, раньше, чем устройство АПВ вернется в состояние готовности к новому действию, т. е. должно быть

$$t_{\text{АПВ2}} \geq t_{\text{АПВ1}} + t_{\text{н.в}} + t_{\text{с.з max}} + t_{\text{о.в}} + t_{\text{зап}}, \quad (10.2)$$

где $t_{\text{зап}}$ — время, принимаемое равным ступени селективности защиты линии;

устройство должно быть готовым к действию не раньше, чем это допускается по условиям работы выключателя после успешного включения его в работу устройством АПВ.

Опыт показывает, что для однократного АПВ оба указанных в пункте 3 требования выполняются, если принять $t_{\text{АПВ2}} = 15 \dots 25$ с. Для УАПВ двукратного действия время возврата в состояние готовности после второго цикла принимается равным $t_{\text{АПВ2}} = 60 \dots 100$ с.

§ 10.2. СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Схемы устройства электрического АПВ, подобно схемам релейной защиты, выполняются на постоянном и переменном, в том числе выпрямленном, оперативном токе. Механические АПВ грузовых и пружинных приводов некоторых типов выключателей, еще встречающихся в эксплуатации, вообще не требуют оперативного тока. Они действуют при срабатывании встроенных в привод реле прямого действия и включают отключившийся выключатель без выдержки времени. Условия работы механических приводов в цикле АПВ крайне тяжелые. При включении выключателя возникают увеличенные ударные нагрузки, расстраивающие привод. К недостаткам схем АПВ с механическими приводами относится и отсутствие в них выдержки времени. Этих недостатков не имеют электрические АПВ.

Устройства АПВ на переменном оперативном токе. Автоматическое повторное включение при наличии переменного оперативного тока можно осуществить на выключателях с грузовыми и пружинными приводами. В их схему управления (рис. 10.1) входят различные вспомогательные контакты. В зависимости от того, с какими деталями и узлами привода связаны эти контакты, их можно разделить на следующие три группы.

1-я группа связана с механизмом натяжения включающих пружин и переключается при изменении состояния пружины. Вспомогательный контакт, разомкнутый при ненатянутых пружинах и замыкающийся только в момент их полного натяжения, называют контактом готовности привода. Он управляет цепью электромагнита включения YAC . В схемах автоматики, рассматриваемых в учебнике, этот контакт обозначен как $Q.6$. Другой контакт, связанный с пружиной, действует в обратном порядке и используется в качестве контакта конечного выключателя в цепи электродвигателя, заводящего включающую пружину, в рассматриваемых схемах автоматики он обозначен как $Q.4$.

2-я группа контактов $Q.1$, $Q.2$, $Q.3$ связана с валом привода и переключается при изменении положения выключателя по любой причине.

К 3-й группе относится так называемый аварийный контакт $Q.5$, который замыкается при включении выключателя, остается замкнутым при действии релейной защиты и размыкается только при оперативном отключении выключателя. В конкретной схеме автоматики могут быть использованы не все названные вспомогательные контакты. Если в схеме содержатся цепи управления несколькими выключателями, то в указанное обозначение контактов вводятся цифровые обозначения соответствующих циклов выключателей. Так, для выключателя $Q.2$ это контакты $Q.2.1$, $Q.2.2$ и т. д.

На схеме рис. 10.1, а все вспомогательные контакты показаны в положении, соответствующем отключенному выключателю и полностью заведенной включающей пружине. Натяжение пружины осуществляется электродвигателем M , в течение времени его работы контакт $Q.6$ готовности привода остается разомкнутым, не допуская включения выключателя при не полностью натянутой пружине. При окончании натяжения пружины контакт $Q.6$ замыкается, а конечный выключатель — контакт $Q.4$ — размыкает цепь электродвигателя M . Операции включения и отключения осуществляются кнопочными выключателями $SB1$ и $SB2$. Для выполнения АПВ мгновенного действия параллельно контакту выключателя $SB1$ включается аварийный вспомогательный контакт $Q.5$, создающий цепь несоответствия и обеспечивающий автоматическое повторное включение выключателя только при его отключении релейной защитой. Последовательно с контактом $Q.5$ включены указательное реле KH и накладка SX . В цепь электродвигателя дополнительно включается замыкающийся вспомогательный контакт выключате-

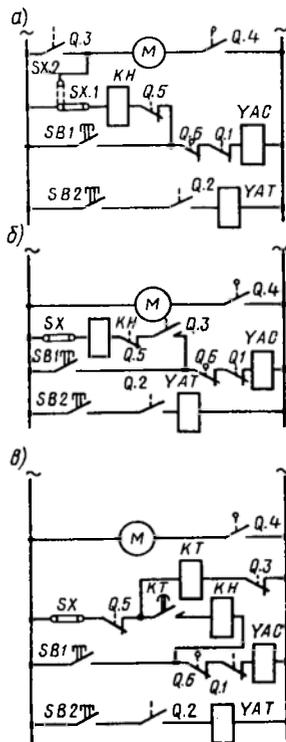


Рис. 10.1. Схемы устройства АПВ на переменном оперативном токе выключателей с грузовыми и пружинными приводами

ля $Q.3$, обеспечивающий завод включающих пружин только при включенном положении выключателя.

При успешном АПВ выключатель остается включенным, пружины заводятся и привод приходит в состояние готовности через время $t_{г.п} = 6 \dots 15$ с. В случае неуспешного АПВ выключатель отключается. При этом однократность действия УАПВ можно обеспечить, если время включенного состояния выключателя меньше времени, необходимого для завода включающих пружин, т. е. наибольшая выдержка времени релейной защиты должна быть меньше указанного минимального времени подготовки привода к включению.

Накладка SX имеет два положения: в положении $SX2$ привод подготавливается к действию при отключенном выключателе, а после включения выключателя контактом кнопочного выключателя $SB1$ накладка вновь переводится в положение $SX1$. Во включенном положении выключателя двигатель заводит пружины и УАПВ снова готово к действию. Недостаток схемы — применение ручной операции с накладкой SX .

Схему УАПВ можно упростить и сделать более универсальной, если последовательно с аварийным вспомогательным контактом $Q.5$ включить импульсный замыкающий вспомогательный контакт $Q.3$ выключателя (рис. 10.1, б), исключив вспомогательный контакт из цепи электродвигателя. Благодаря этому электродвигатель может заводить пружины при любом положении выключателя, и необходимость в переключении накладки при неуспешном АПВ отпадает. Накладка SX служит только для вывода схемы УАПВ из действия. Наличие в схеме импульсного замыкающего контакта $Q.3$ обеспечивает однократность действия УАПВ. Мгновенно действующее УАПВ с импульсным замыкающим контактом выполняют на выключателях, оборудованных приводом ПП-67, у которого имеется такой контакт.

Электрическое мгновенно действующее устройство АПВ, как и механическое, начинает включать выключатель еще до того, как элементы выключателя и привода придут в состояние покоя, следствием чего являются дополнительные механические удары и плохая работа привода. Наряду с этим короткие замыкания не всегда успевают самоустраниться, так как время бестоковой паузы мало (около 0,2—0,3 с). Устройство АПВ с выдержкой времени не имеет указанного недостатка. На рис. 10.1, в показана схема, отличающаяся от предыдущей (рис. 10.1, а) наличием реле времени KT , например типа ЭВ-218 с импульсным замыкающим контактом KT . Реле времени запускается при отключении выключателя и замыкании вспомогательного контакта $Q.3$. Для обеспечения однократности действия устройства АПВ минимальное время подготовки привода к включению должно быть больше, чем наибольшая выдержка времени релейной защиты и время действия АПВ, вместе взятые.

Устройство АПВ на выпрямленном оперативном токе. В устройстве АПВ используется комплектное реле РПВ-358, в которое входят (рис. 10.2, а):

реле времени KT , создающее выдержку времени $t_{АПВ}$ от момента пуска устройства АПВ до замыкания цепи контактора включения выключателя; *промежуточное реле $KL1$* с двумя обмотками — обмоткой тока $KL1.1$ (последовательной) и обмоткой напряжения $KL1.2$; реле при срабатывании замыкает цепь включения выключателя;

конденсатор $C1$, в результате разряда которого срабатывает реле $KL1$ и обеспечивается однократность действия УАПВ;

резисторы: $R1$, обеспечивающий термическую стойкость реле времени; *$R2$* , ограничивающий скорость заряда конденсатора $C1$; *$R3$* , разряжающий конденсатор $C1$ при срабатывании устройств защи-

ты, после действия которых не должно происходить АПВ, и при отключении выключателя ключом управления SA (запрет АПВ); диод VD, предотвращающий разряд конденсатора C1 при понижении напряжения на блоке питания и заряда (UGV) вследствие близких коротких замыканий.

Для питания электромагнита отключения YAT выключателя используется предварительно заряженный конденсатор C2 блока питания и заряда UGV (рис. 10.2, б). В схему введено промежуточное реле KL2 для разделения оперативных цепей электромагнита отключения и реле РПВ-358. Электромагнит включения YAC выключателя получает питание от трансформатора собственных нужд T1 через мощный выпрямитель VS (рис. 10.2, в).

Схема действует следующим образом. При отключении выключателя по любой причине вследствие замыкания его вспомогательного контакта Q.1 срабатывает реле положения выключателя KQT и замыкает свой контакт KQT.1 в цепи пуска устройства АПВ. Если отключение произошло не от ключа управления SA, то он остается в положении «Включено», а его контакт SA.1 замкнут. Таким образом фиксируется несоответствие положений ключа управления и выключателя, необходимое для пуска реле времени KT. Его контакт KT.1, размыкаясь без выдержки времени, включает резистор R1, обеспечивая термическую стойкость реле, а контакт KT.2 с заданной выдержкой времени подключает обмотку KLI.2 промежуточного реле к конденсатору C1. Вследствие разряда конденсатора реле KLI срабатывает и замыкает контакт KLI.1 в цепи контактора включения выключателя KM, в которую включена последовательная обмотка KLI.1 реле. Она удерживает реле KLI в возбужденном состоянии до полного включения выключателя. При успешном АПВ выключатель остается во включенном положении. Действие устройства АПВ фиксируется указательным реле KH.

Схема становится готовой к новому повторному действию после заряда конденсатора C1. Время заряда принимается $t_{АПВ2} = 20$ с. При этом обеспечивается однократность действия устройства АПВ, так как конденсатор заряжается только при включенном положении выключателя. Включения выключателя при неуспешном АПВ не происходит.

В схему УАПВ включено двухобмоточное реле блокировки KBS с замедленным возвратом $t_{в.р} = 0,3 \dots 0,4$ с. Замедление достигается закорачиванием последовательной обмотки KBS.2 реле его замыкающим контактом KBS.3 (рис.

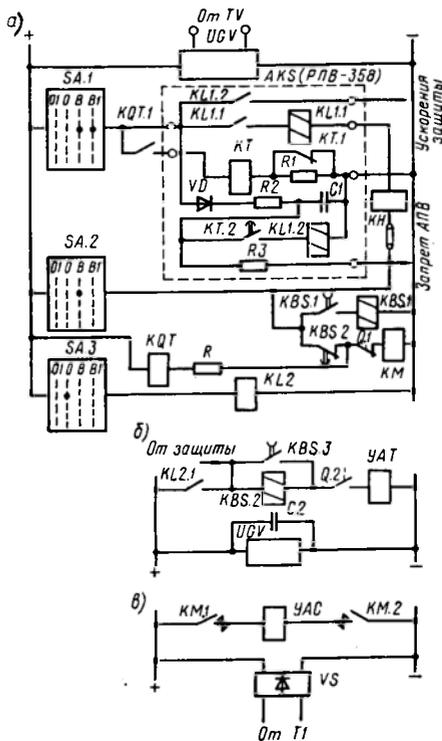


Рис. 10.2. Схема устройства АПВ на выпрямленном оперативном токе с использованием реле РПВ-358

10.2, б). Реле предназначается для предотвращения многократных включений выключателя при неисправностях в оперативных цепях, например при сваривании контакта *KL1.1*. В таких случаях при первом воздействии на отключение выключателя реле *KBS* срабатывает и самоудерживается контактом *KBS.1* в цепи обмотки *KBS.1*, а его контакт *KBS.2* размыкает цепь контактора *KM* электромагнита включения *УАС* выключателя.

§ 10.3. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ЛИНИЙ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ

При установке устройств АПВ на линиях с двусторонним питанием необходимо учитывать, что для восстановления работоспособности поврежденной линии требуется ее отключение и включение с двух сторон. В связи с этим устройства АПВ следует устанавливать на выключателях обоих концов защищаемого элемента. Необходимо также учитывать возможность несинхронного повторного включения и в ряде случаев принимать специальные меры, чтобы не допускать такое включение. Это достигается с помощью специальных органов, состоящих из реле, контролирующего наличие напряжения на линии, и реле контроля синхронизма. Устройства АПВ, дополненные этими органами, называются *УАПВ с контролем синхронизма*.

Иногда можно отказаться от мер, предотвращающих несинхронное включение, и применять АПВ без контроля синхронизма. Это допустимо в следующих случаях:

а) при наличии большого числа параллельных связей, когда отключение одной из линий не сопровождается нарушением синхронизма; в этом случае применяют обычные устройства АПВ;

б) если имеется быстродействующая защита и быстродействующие выключатели, позволяющие обеспечить полное время цикла АПВ (отключение — включение) не более $t_{АПВ} = 0,25 \dots 0,5$ с при повреждении в любой точке защищаемой линии; за указанное время векторы ЭДС разделившихся источников не успевают разойтись на значительный угол, поэтому повторное включение сопровождается допустимыми толчками тока и завершается успешным вхождением в синхронизм; устройство АПВ с таким временем действия называется *быстродействующими*;

в) если включение на несинхронную работу при любых углах между ЭДС разделившихся источников не представляет опасности для оборудования и обеспечивается быстрое восстановление синхронизма; такое устройство АПВ называется *несинхронным*. В системах с глухозаземленными нейтралью наряду с трехфазным применяется также однофазное автоматическое повторное включение (ОАПВ). Устройства ОАПВ имеют определенные преимущества перед трехфазными УАПВ. Однако они значительно сложнее и требуют пофазного управления выключателями. Имеются также схемы совместного согласованного действия устройств

ТАПВ и ОАПВ. Особенности УАПВ линий с двусторонним питанием рассматриваются далее на примере трехфазного УАПВ.

**§ 10.4. УСТРОЙСТВА ТРЕХФАЗНОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ
БЕЗ КОНТРОЛЯ СИНХРОНИЗМА ЛИНИЙ
С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ**

Устройство АПВ линии с параллельными связями. Схема этого устройства АПВ подобна рассмотренной (см. рис. 10.2) схеме УАПВ, предназначенного для линий с односторонним питанием. Отличие заключается лишь в выборе времени срабатывания $t_{АПВ}$ устройств $AKS1$ и $AKS2$ на включение выключателей $Q1$ и $Q2$ соответственно (рис. 10.3, а).

В общем случае отключение поврежденной линии происходит каскадно, поэтому времена $t_{АПВ(1)}$ и $t_{АПВ(2)}$ для выключателей $Q1$ и $Q2$ не одинаковы. На рис. 10.3, б, в построены временные диаграммы для выбора времени срабатывания $t_{АПВ(1)}$ устройства АПВ выключателя $Q1$ и $t_{АПВ(2)}$ устройства АПВ выключателя $Q2$ с учетом каскадного отключения линии. Это значит, что расчетным условием для каждого комплекта устройств защиты и АПВ является короткое замыкание у места их установки (точка K_1 для защиты и УАПВ выключателя $Q1$; точка K_2 для защиты и УАПВ выключателя $Q2$). В этом случае защита рассматриваемого комплекта имеет минимальную выдержку времени, а выключатель противоположного конца линии из-за возможного отказа быстродействующих защит отключается резервными защитами с максимальной выдержкой времени.

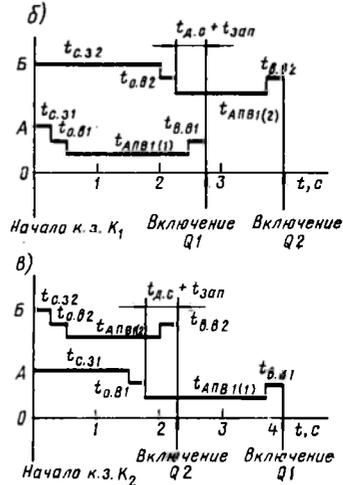
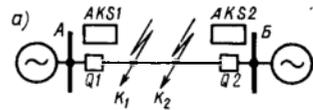


Рис. 10.3. Временные диаграммы для выбора уставок устройств АПВ без проверки синхронизма

Из временных диаграмм следует:

$$t_{АПВ(1)} = t_{с.з2} + t_{о.в2} + t_{д.с} + t_{зап} - t_{с.з1} - t_{о.в1} - t_{в.в1};$$

$$t_{АПВ(2)} = t_{с.з1} + t_{о.в1} + t_{д.с} + t_{зап} - t_{с.з2} - t_{о.в2} - t_{в.в2}.$$

Обычно $t_{о.в1} = t_{о.в2}$, поэтому

$$\left. \begin{aligned} t_{АПВ(1)} &= t_{с.з2} + t_{д.с} + t_{зап} - (t_{с.з1} + t_{в.в1}), \\ t_{АПВ(2)} &= t_{с.з1} + t_{д.с} + t_{зап} - (t_{с.з2} + t_{в.в2}). \end{aligned} \right\} \quad (10.3)$$

Нетрудно заметить, что рассмотренное устройство АПВ включает линию с обеих сторон на устойчивое короткое замыкание. Второе (с другой стороны линии) включение нежелательно; целесообразно осуществлять поочередное включение выключателей. Например, сначала включить выключатель $Q1$, а затем выключатель $Q2$, разрешив его включение только при наличии напряжения на включаемой линии. Оно появляется, если короткое замыкание после отключения линии самоустраняется и выключатель $Q1$ успешно включается. При устойчивом коротком замыкании выключатель $Q1$ после повторного включения отключается, линия остается без напряжения, устройство АПВ выключателя $Q2$ не действует.

Для осуществления указанного действия УАПВ в его схему вводится мак-

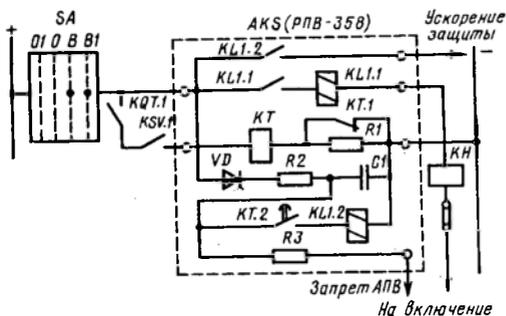


Рис. 10.4. Схема устройства АПВ с проверкой наличия напряжения на линии

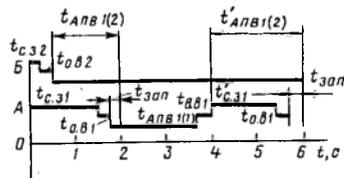


Рис. 10.5. Временная диаграмма для выбора времени срабатывания устройства АПВ с проверкой наличия напряжения на линии

симальное реле напряжения, контролирующее наличие напряжения на линии. Замыкающий контакт $KSV.1$ реле включается в цепь обмотки реле времени KT комплектного реле AKS типа РПВ-358 (рис. 10.4). При этом пуск устройства АПВ происходит, если обеспечиваются несоответствие положений выключателя (см. рис. 10.2, реле положения KQT) и его ключа управления SA и наличие напряжения на включаемой линии. Напряжение срабатывания реле контроля напряжения принимается $U_{с.р} = (0,7 \dots 0,8) (U_{ном}/K_U)$. Время срабатывания $t_{АПВ(1)}$ находится согласно (10.3), а время срабатывания $t_{АПВ(2)}$ устройства АПВ с проверкой наличия напряжения (на выключателе $Q2$) — на основе временной диаграммы (рис. 10.5).

При повреждении линии и отключении выключателя $Q2$ реле напряжения может находиться в состоянии после срабатывания и разрешать действовать устройству АПВ до тех пор, пока не отключится выключатель $Q1$. Это учитывается при определении времени. Из графиков рис. 10.5 имеем

$$t_{АПВ(2)} \geq t_{с.з1} + t_{о.в1} + t_{зап} - t_{с.з2} - t_{о.в2} \quad (10.4)$$

Реле напряжения может сработать и при включении выключателя $Q1$ на устойчивое короткое замыкание, однако выключатель $Q2$ при этом включаться не должен, поэтому время действия его УАПВ должно быть больше времени действия защиты $t'_{с.з1}$ после неуспешного АПВ и времени отключения выключателя $t_{о.в1}$, вместе взятых:

$$t'_{АПВ(2)} \geq t'_{с.з1} + t_{о.в1} + t_{зап} \quad (10.5)$$

Принимается большее из значений, полученных по (10.4) и (10.5). Обычно применяют ускорение защиты после АПВ. В таком случае $t'_{с.з1}$ — время действия защиты с учетом ее ускорения.

На параллельных линиях с односторонним питанием условия автоматического повторного включения аналогичны, поэтому здесь также применяют устройства АПВ без проверки синхронизма, но с наличием контроля напряжения.

Быстродействующее УАПВ. Быстродействующее УАПВ не требует каких-либо дополнительных устройств, разрешающих его действие. Для его выполнения можно использовать схему, рассмотренную выше (см. рис. 10.2). При этом на выходные зажимы реле следует вывести дополнительные цепи от контакта *КТ.2* реле времени (на рис. 10.6 зажимы *а, б*). Этим создается возможность замыкать цепь обмотки *КЛ1.2* реле без выдержки времени.

В настоящее время только воздушные выключатели обладают достаточным для осуществления быстродействующего АПВ временем включения $t_{в.в} = 0,2 \dots 0,3$ с. При этом поврежденная линия должна отключаться с двух сторон быстродействующими защитами без выдержки времени. Пуск устройства быстродействующего АПВ производится с контролем давления воздуха в резервуарах выключателя, которое должно быть достаточным для двух операций отключения.

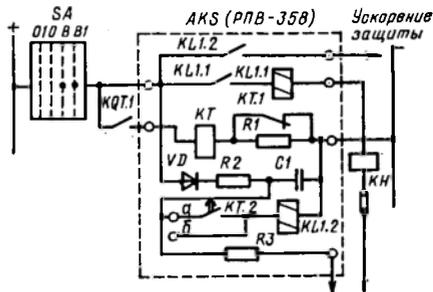


Рис. 10.6. Схема устройства быстродействующего АПВ

Несинхронное УАПВ. Применять устройства несинхронного АПВ можно, если после несинхронного включения обеспечивается быстрая ресинхронизация и если, несмотря на понижение напряжения, не нарушается устойчивость основных нагрузок. Для облегчения ресинхронизации при несинхронном АПВ устройства автоматики должны осуществлять определенные операции.

При возникновении дефицита мощности автоматически производятся: отключение неответственных потребителей устройствами АЧР; набор нагрузки незагруженными агрегатами; включение резервных источников питания и ряд других мероприятий.

Если создается избыток мощности, то производятся отключение части генераторов, электрическое или механическое их торможение и автоматическое регулирование турбин.

В связи с тем что несинхронное АПВ может происходить при любых углах между векторами ЭДС разделившихся частей энергосистемы, возможно появление при включении больших уравнительных токов $I_{ур \max}$ и повышенных электродинамических усилий в элементах энергосистемы.

Несинхронное АПВ допустимо, если при включении отношение максимального значения периодической составляющей уравнительного тока к номинальному току равно или меньше [76]: $I_{ур \max} / I_{ном} \leq 0,625 / X_d''$ — для турбогенераторов с косвенным охлаждением обмоток и гидрогенераторов с успокоительными

контурами; $I_{ур\ max}/I_{ном} \leq 3$ — для турбогенераторов с непосредственным охлаждением обмоток и гидрогенераторов без успокоительных контуров; $I_{ур\ max}/I_{ном} \leq 0,84/X_d''$ — для синхронных компенсаторов. Здесь X_d'' — сверхпереходное индуктивное сопротивление синхронного генератора или компенсатора в относительных единицах. Для трансформаторов и автотрансформаторов допустимый $I_{ур\ max}$ должен быть не больше тока трехфазного к.з. $I_{к.рсч}^{(3)}$ при повреждении на выводах низшего напряжения. Ток $I_{к.рсч}^{(3)}$ определяется с учетом сопротивления питающей сети, задаваемого мощностью короткого замыкания S_k :

$$I_{к.рсч}^{(3)} = I_{ном} / (U_k + S_{ном} / S_k),$$

где $I_{ном}$, $S_{ном}$ — номинальные параметры трансформатора А и МВ·А; U_k — напряжение к.з. трансформатора в относительных единицах; S_k — мощность к.з., для питающей сети напряжением 6—10 кВ принимается $S_k = 500$ МВ·А, для сети 35 кВ принимается $S_k = 2500$ МВ·А, для сети 110 кВ принимается $S_k = 1500$ МВ·А [77].

При этом $I_{ур\ max} \leq k_T I_{к.рсч}^{(3)}$, где k_T — коэффициент, учитывающий возможность повышения ЭДС в условиях НАПВ; принимает следующие значения $k_T = 1; 0,95; 0,85$ при $E''_q/E_{ном} = 1,05; 1,2; 1,5$ соответственно.

Если заведомо известно, что частота и напряжение при несинхронных включениях отличаются от номинальных не более чем на $\Delta f_s = \Delta U = \pm 5\%$, то можно допустить увеличение тока против расчетного значения на $\Delta I_{ур\ max} = 13\%$ для турбогенераторов и на $\Delta I_{ур\ max} = 35\%$ для гидрогенераторов с успокоительными контурами. Выключатели, разъединители, трансформаторы тока и другое оборудование, выбранные по общепринятой методике, не требуют дополнительной проверки на электродинамическую стойкость при наличии несинхронного УАПВ.

Несинхронное АПВ сопровождается не только возникновением сверхтоков и понижением напряжения, но и кратковременным появлением токов и напряжений обратной и нулевой последовательностей из-за неодновременного замыкания фаз выключателя. В связи с этим рассмотренные выше защиты, исключая защиты, основанные на дифференциальном принципе, могут действовать неправильно на включаемой линии и на смежных с ней участках.

Имеется ряд способов, обеспечивающих правильное поведение защиты при наличии несинхронного УАПВ: понижение чувствительности защиты, например токовой отсечки с включением реле на фазные токи (для токовой отсечки нулевой последовательности и для дистанционной защиты этот способ, как правило, малоэффективен); увеличение времени действия защиты; применение различных блокировок, обеспечивающих кратковременный вывод из работы быстродействующих защит, способных подействовать неправильно при несинхронном АПВ, — способ широко применяется для блокировки дистанционной защиты при возникновении качаний.

Для выполнения несинхронного УАПВ можно использовать реле АКС типа РПВ-358. При этом схема устройства несинхронного УАПВ аналогична схеме устройства АПВ для линий с односторонним питанием (см. рис. 10.2). При поочередном включении выключателей устройство несинхронного АПВ с одного конца линии осуществляется с контролем наличия напряжения (см. рис. 10.4).

**§ 10.5. УСТРОЙСТВА ТРЕХФАЗНОГО
АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ
С КОНТРОЛЕМ СИНХРОНИЗМА ЛИНИЙ
С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ**

Устройства АПВ с контролем синхронизма применяют на линиях с двусторонним питанием, когда отключение рассматриваемой линии может сопровождаться нарушением синхронизма, а применение несинхронного УАПВ недопустимо из-за больших толчков уравнительного тока. В устройствах АПВ с контролем синхронизма предусматриваются реле, не допускающие включения линии при больших значениях углов между векторами ЭДС, при которых толчок уравнительного тока превышает допустимое значение.

К рассматриваемой группе устройств АПВ относятся УАПВ *с ожиданием синхронизма* (АПВОС) и УАПВ *с улавливанием синхронизма* (АПВУС). Устройства АПВОС разрешают включать линию только при наличии синхронизма, а поэтому могут устанавливаться лишь на линиях, имеющих достаточно мощные параллельные связи, которые обеспечивают сохранение синхронизма при отключении рассматриваемой линии. Применение УАПВ без проверки синхронизма недопустимо, так как при выводе из работы параллельных связей или при их одновременном повреждении с рассматриваемой линией синхронизм будет нарушен.

Устройства АПВУС устанавливаются на линиях, имеющих слабые параллельные связи или не имеющие их. При отключении таких линий нарушается синхронная работа, но, несмотря на это, устройство АПВУС разрешает включить линию в определенном диапазоне углов между векторами напряжений, если разность частот несинхронно работающих частей энергосистемы не превышает допустимого значения.

Устройство АПВОС предусматривает поочередное включение выключателей с обоих концов линии. При этом на том конце линии, который включается раньше, достаточно производить АПВ с контролем отсутствия напряжения на линии, а наличие синхронизма проверять при включении выключателя с противоположного конца. Обычно устройства АПВОС обоих концов линии имеют одинаковую схему, содержащую орган, контролирующий отсутствие напряжения и орган контроля синхронизма.

Изображенная на рис. 10.7 схема отличается от рассмотренных выше (см. рис. 10.2, 10.4, 10.6) тем, что в цепь пуска реле времени KT включены контакт реле контроля синхронизма KSS и контакты реле контроля напряжения KSV . Контакт $KSV.1$ замкнут при отсутствии напряжения на линии, а контакт $KSV.2$ — при наличии напряжения. Положение накладки SXI определяет действие УАПВ. Если накладка замкнута, то повторное включение выключателя происходит при отсутствии напряжения на ли-

нии. При этом в устройстве АПВОС противоположного конца линии накладка *SX1* должна быть разомкнутой. С этого конца линии контролируется наличие синхронизма. Выключатель сможет включиться только при наличии напряжения на линии и при условии, что угол между вектором этого напряжения и вектором напряжения на шинах не превышает допустимого значения.

В условиях эксплуатации имеются случаи приваривания контакта реле *KSS*. Это приводит к включению выключателя на

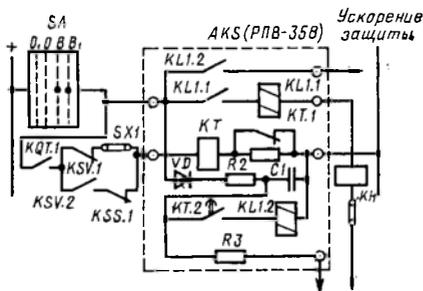


Рис. 10.7. Схема устройства АПВОС

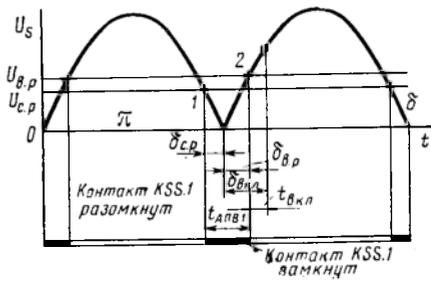


Рис. 10.8. Диаграмма, поясняющая работу реле контроля синхронизма:

1 — момент срабатывания реле; 2 — момент возврата реле

устойчивое короткое замыкание после неуспешного АПВ на противоположном конце. Наличие контакта *KSV.2* предотвращает такие включения.

Реле контроля синхронизма сравнивает два напряжения: напряжение на шинах и напряжение на включаемой линии. Реле реагирует на геометрическую разность этих напряжений, т. е. на *напряжение биения* U_s . Реле *KSS* контроля синхронизма типа РН-55 использует обычную электромагнитную систему минимального реле напряжения. Но реле вместо одной имеет две независимые обмотки, каждая из которых включается на одно из сравниваемых напряжений так, что при равенстве их значений и совпадении по фазе результирующий магнитный поток отсутствует и контакт *KSS.1* реле замкнут.

При смещении векторов сравниваемых напряжений друг относительно друга результирующий магнитный поток и вместе с ним вращающий момент в реле возрастают. При некоторых значениях угла $\delta_{в.р}$ между векторами сравниваемых напряжений реле размыкает соответствующий контакт и запрещает действовать устройству АПВОС (рис. 10.8). Таким образом, реле *KSS* находится в состоянии после срабатывания в течение времени $t = (\delta_{с.р} + \delta_{в.р})/\omega_s$, где ω_s — угловая частота скольжения. Это время сравнивается с временем $t_{АПВ1}$. Включение разрешается при $t \geq t_{АПВ1}$. Очевидно, определяющим является условие $t_{АПВ1} = t$ (рис. 10.8). При этом включение происходит при некотором угле $\delta_{вкл}$, которому соответствует максимальная допустимая угловая частота скольжения $\omega_{s \max}$. Из рис. 10.8 следует $\omega_{s \max} = (\delta_{вкл} - \delta_{в.р})/t_{вкл}$. С учетом этого $t_{АПВ1} = (\delta_{с.р} + \delta_{в.р}) \times t_{вкл} / (\delta_{вкл} - \delta_{в.р})$.

При коэффициенте возврата реле РН-55 $k_p = \delta_{в.р}/\delta_{с.р} = 1,25$

$$\delta_{в.р} = \delta_{вкл} t_{АПВ1} / (1,8 t_{вкл} + t_{АПВ1}), \quad (10.6)$$

где $t_{вкл}$ — максимальное время включения выключателя,

Выдержка времени $t_{АПВ1}$ выбирается с учетом выражений (10.4) и (10.5), а выдержка времени $t_{АПВ2}$ устройства АПВ, которое осуществляет проверку отсутствия напряжения на линии и включает выключатель первым, выбирается по выражению (10.3). Напряжение срабатывания реле контроля напряжения (при замыкании контакта $KSV.1$) принимается $U_{с.р} = (0,4 \dots 0,5) U_{ном}/K_U$.

Реле РН-55 позволяет отрегулировать угол $\delta_{в.р}$ от 20 до 40°, что значительно меньше допустимого угла включения; он принимается обычно равным $\delta_{вкл} \leq \leq 70 \dots 75^\circ$ [57]. Недостатком реле является также его электромеханическая элементная база. Отечественная промышленность выпускает более совершенные полупроводниковые реле серии РСФ11 (см. § 3.5). Реле обеспечивает дискретное изменение уставки через 5° в диапазоне 20—70°. Использование реле РСФ11 вместо реле РН-55 не меняет принципа действия устройства АПВОС.

Устройство АПВУС, как и АПВОС, осуществляет поочередное включение выключателей; при этом сначала включается выключатель на том конце линии, на котором контролируется отсутствие напряжения, а затем включается выключатель на другом конце, если позволяют органы, контролирующие разность частот. Устройство АПВУС отличается от рассмотренного устройства АПВ

(см. рис. 10.2) наличием органов, контролирующих разность частот напряжений разделившихся частей энергосистемы. Простейший орган контроля разности частот состоит из двух минимальных реле напряжения: $KSV1$

и $KSV2$. К обоим реле подводится напряжение биения U_s (рис. 10.9). Время $t_{1,2}$, в течение которого оба реле держат замкнутыми контакты в цепи обмотки реле времени, зависит от скорости изменения напряжения, характеризующей разность частот.

Повторное включение разрешается, когда время $t_{1,2}$ достигает или превышает заданное время контроля t_k (на рис. 10.9 второй период биения). Схема собрана так, что пуск устройства АПВУС происходит только в конце периода биения.



Рис. 10.9. Диаграмма, поясняющая работу органа, контролирующего разность частот напряжений разделившихся частей системы

Уставки УАПВУС выбирают таким образом, что повторное включение происходит при малых углах между напряжениями, без значительных толчков уравнительного тока. Это позволяет использовать устройства АПВУС на одиночных транзитных линиях, а также линиях, имеющих слабые параллельные связи. Устройства релейной защиты при АПВУС обычно действуют правильно и не требуют дополнительных мер.

Отбор напряжения линий электропередачи для УАПВ. Рассмотренные устройства АПВ, осуществляющие контроль напряжения на линии или проверку синхронности напряжений на линии и шинах, требуют измерения соответствующих напряжений. Для этого обычно применяются трансформаторы напряжения. Однако на линиях трансформаторы напряжения устанавливают редко,

поэтому в схемах АПВ измерение напряжения линии выполняют с помощью специальных *устройств отбора напряжения*, основанных на использовании емкостных делителей. В качестве емкостных делителей напряжения используют, например, высокочастотные конденсаторы связи, изоляторы вводов масляных выключателей и силовых трансформаторов, а также проходные, опорные и подвесные изоляторы.

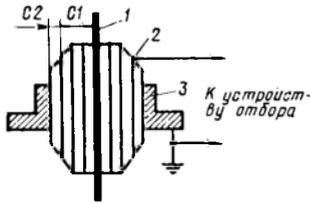


Рис. 10.10. Конденсаторный ввод масляного выключателя

Отбор напряжения с помощью высокочастотных конденсаторов связи возможен, если на линии используется соответствующая защита, а ее каналом связи является защищаемая линия, на концах которой установлены высокочастотные заградители и конденсаторы связи. Отбор напряжения с помощью вводов масляных выключателей возможен, если эти вводы имеют специальную конструкцию. Промышленность выпускает такие вводы для выключателей на напряжение 110 кВ и выше — это так называемые *конденсаторные вводы*. Их внутренняя бакелитовая изоляция разделена на ряд слоев с помощью концентрических цилиндров из металлической фольги. Такой ввод (рис. 10.10) можно рассматривать как емкостный делитель, состоящий из конденсатора $C1$ (между токоведущим стержнем 1 и последним металлическим цилиндром 2) и конденсатора $C2$ (между заземленным фланцем 3 и последним металлическим цилиндром 2). Цилиндр 2 снабжен выводом, который используется для подключения устройства отбора напряжения.

Отбор напряжения с помощью проходных, опорных и подвесных изоляторов обеспечивает меньшую, чем в рассмотренных случаях, точность замера. Это объясняется тем, что токи утечки, определяющие значение и фазу напряжения, зависят от состояния поверхности изоляторов. Поэтому такие устройства рекомендуются применять только для контроля напряжения на линиях.

§ 10.6. ТРЕБОВАНИЯ К УСТРОЙСТВАМ АВР, ПРИНЦИПЫ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

Требования к устройствам АВР. В системах электроснабжения при наличии двух (и более) источников питания часто целесообразно работать по разомкнутой схеме. При этом все источники включены, но не связаны между собой, каждый из них обеспечивает питание выделенных потребителей. Такой режим работы сети объясняется необходимостью уменьшить ток к.з., упростить релейную защиту, создать необходимый режим по напряжению, уменьшить потери электроэнергии и т. п. Однако при этом надежность электроснабжения в разомкнутых сетях оказывается более низкой, чем в замкнутых, так как отключение единственного источника приводит к прекращению питания всех его потребителей. Электроснабжения потребителей, потерявших питание, можно восстановить автоматическим подключением к другому источнику питания с помощью устройства автоматического включения резервного источника (УАВР).

Применяют различные схемы УАВР, однако все они должны удовлетворять изложенным ниже основным требованиям.

1. Находиться в состоянии постоянной готовности к действию и срабатывать при прекращении питания потребителей по любой причине и наличии нормального напряжения на другом, резервном для данных потребителей источнике питания. Чтобы не допустить включения резервного источника на короткое замыкание, линия рабочего источника к моменту действия УАВР должна быть отключена выключателем со стороны шин потребителей. Отключенное состояние этого выключателя контролируется его вспомогательными контактами или реле положения, и эти контакты должны быть использованы в схеме включения выключателя резервного источника. Признаком прекращения питания является исчезновение напряжения на шинах потребителей, поэтому воздействующей величиной устройства АВР обычно является напряжение. При снижении напряжения до определенного значения УАВР приходит в действие.

2. Иметь минимально возможное время срабатывания $t_{\text{АВР1}}$. Это необходимо для сокращения продолжительности перерыва питания потребителей и обеспечения самозапуска электродвигателей. Минимальное время $t_{\text{АВР1}}$ определяется необходимостью исключить срабатывания УАВР при коротких замыканиях на элементах сети, связанных с рабочим источником питания, если при этом напряжение на резервируемых шинах станет ниже напряжения срабатывания устройства АВР. Эти повреждения отключаются быстродействующими защитами поврежденных элементов. При выборе выдержки времени необходимо также согласовывать действие УАВР с действием УАПВ и с действием других устройств АВР, расположенных ближе к рабочему источнику питания.

3. Обладать однократностью действия, что необходимо для предотвращения многократного включения резервного источника на устойчивое короткое замыкание.

4. Обеспечивать вместе с защитой быстрое отключение резервного источника питания и его потребителей от поврежденной резервируемой секции шин и тем самым сохранять их нормальную работу. Для этого предусматривается ускорение защиты после АВР.

5. Не допускать опасных несинхронных включений синхронных электродвигателей и перегрузок оборудования.

В зависимости от конструкции коммутационного аппарата, схемы электроснабжения и ее номинального напряжения основные требования к устройствам АВР выполняются по-разному (например, сетевые УАВР, устройства АВР в сетях напряжением до 1 кВ).

Пусковые органы и выбор параметров УАВР. В качестве примера рассмотрим УАВР на секционном выключателе схемы сети

(рис. 10.11, а). В этой схеме шины секционированы; секционный выключатель $Q5$ отключен. Каждая секция питается от отдельного источника. Схему УАВР можно выполнить так, что устройство будет действовать на включение секционного выключателя $Q5$ при отключении любого из источников питания и исчезновении напряжения на любой секции шин. В этом случае осуществляется взаимное резервирование с помощью УАВР *двустороннего действия*.

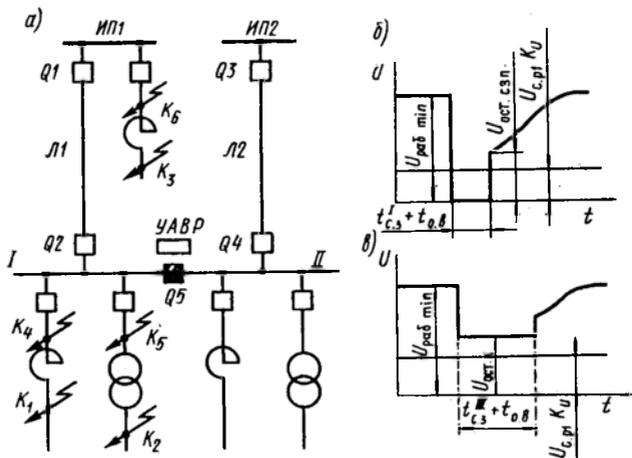


Рис. 10.11. Схема сети с устройством АБР на секционном выключателе (а) и графики изменения напряжения на резервируемой секции шин при к.з. (б, в)

Но прежде чем включить выключатель $Q5$, устройство АБР должно отключить выключатель $Q2$ или $Q4$, если он остался включенным при исчезновении напряжения на соответствующей секции шин. Для этой цели в схему УАВР вводят пусковой орган, в котором обычно применяют минимальные реле напряжения. В общем случае УАВР содержит также орган выдержки времени. Если резервируемой является одна из секций, например секция I, то УАВР включает выключатель $Q5$ только при исчезновении напряжения на этой секции, предварительно отключив выключатель $Q2$, т. е. осуществляет *одностороннее действие*. Для удовлетворения основных требований, предъявляемых к УАВР, параметры пускового органа и органа выдержки времени выбирают следующим образом.

Минимальный пусковой орган напряжения не должен срабатывать при понижениях напряжения на шинах, например секции I, до $U_{\text{ост.к}}$, вызванных короткими замыканиями в точках K_1 — K_3 (за элементами с сосредоточенными параметрами). Эти повреждения обычно отключаются защитой с выдержкой вре-

мени третьей ступени $t_{с.з}^{III}$. Характер изменения напряжения на шинах секции I и напряжение срабатывания показаны на рис. 10.11, *в*.

$$U_{с.р1} \leq U_{ост.н} / (k_{отс} K_U), \quad (10.7)$$

где $k_{отс} = 1,1 \dots 1,2$.

При к.з. в точках $K_4 - K_6$ устройство АВР тоже не должно срабатывать. В этих случаях напряжение на шинах секции I может снизиться практически до нуля (рис. 10.11, *б*), и минимальные реле напряжения срабатывают. Короткие замыкания в точках $K_4 - K_6$ ликвидируются быстродействующими защитами с выдержкой времени $t'_{с.з}$, а реле напряжения будет находиться в положении после срабатывания в течение времени $t'_{с.з} + t_{о.в}$. После оключения поврежденного элемента напряжение на шинах секции I начинает восстанавливаться и осуществляется самозапуск электродвигателей. Для того чтобы исключить действие УАВР, в этом случае необходимо соответствующим образом выбрать выдержку времени $t_{АВР1}$ и обеспечить возврат минимальных реле напряжения в исходное состояние при напряжениях, не больших значения $U_{ост.сэп}$. Это второе условие выбора напряжения срабатывания

$$U_{с.р1} \leq U_{ост.сэп} / (k_{в} k_{отс} K_U), \quad (10.8)$$

где $k_{в} = 1,25$ — коэффициент возврата.

Принимается меньшее значение напряжения срабатывания, полученное из выражений (10.7) и (10.8). В расчетах часто принимают

$$U_{с.р1} = (0,25 \dots 0,4) (U_{ном} / K_U).$$

Оно обычно удовлетворяет обоим условиям. При этом выдержка времени $t_{АВР1}$ должна быть больше времени $t'_{с.з} + t_{о.в}$ (см. рис. 10.11, *б*). Обычно в расчетах принимают наибольшую выдержку времени защит присоединений, отходящих от шин источника питания $ИП1$ и от шин секции I , т. е.

$$t_{АВР1} \geq t_{с.з \max} + \Delta t \quad (10.9)$$

В некоторых схемах УАВР пусковой орган (минимальное реле напряжения) и орган выдержки времени объединены в одном реле. Если на резервируемом элементе системы электроснабжения (например, на линии $Л1$) имеется устройство АПВ, то время $t_{АВР1}$ должно согласовываться с временем действия УАПВ $t_{АПВ1}$ так, чтобы УАВР действовало только после неуспешного действия УАПВ. Для этого время $t_{АВР1}$, полученное из выражения (10.9), необходимо увеличить при однократном УАПВ на значение $t_{АПВ1}$. Если в системе электроснабжения (рис. 10.11, *а*) наряду с рассматриваемым устройством АВР имеется УАВР, расположенное ближе к рабочему источнику питания, то его время действия $t'_{АВР1}$

выбирается с учетом сказанного, а для рассматриваемого УАВР должно выполняться дополнительное условие $t_{\text{АВР1}} \geq t'_{\text{АВР1}} + t_{\text{зап}}$. Время $t_{\text{зап}}$ в зависимости от типов выключателей и реле времени в схемах УАВР принимается 2—3 с.

В условиях эксплуатации случаются перегорания предохранителей или другие неисправности в цепях трансформаторов напряжения. При этом возможны срабатывания минимальных реле напряжения пускового органа. Для предотвращения ложных действий устройства АВР имеется ряд способов, например в пусковом органе используют два минимальных реле напряжения, включенные на разные трансформаторы напряжения. Для этих же целей в пусковом органе вместе с минимальным реле напряжения используют минимальное реле тока, включенное на ток питающей линии $Л1$ (рис. 10.11, а). Такой комбинированный пусковой орган срабатывает лишь тогда, когда вместе с исчезновением напряжения на шинах исчезает ток в линии. Ток срабатывания реле отстраивается от минимального рабочего тока $I_{\text{раб min}}$ питающей линии по условию

$$I_{\text{с.р}} = I_{\text{раб min}} / (k_{\text{отс}} K_I), \quad (10.10)$$

где $k_{\text{отс}} = 1,5$.

В этом случае выдержка времени $t_{\text{АВР1}}$, определяемая из условия (10.9), согласуется только с защитой, действующей при к.з. в точке K_6 . Если к резервируемым шинам подключены синхронные электродвигатели и компенсаторы, то при отключении рабочего источника питания на шинах в течение некоторого времени поддерживается остаточное напряжение благодаря разряду электромагнитной энергии, запасенной этими электродвигателями и компенсаторами. Значение этого напряжения снижается постепенно, поэтому минимальное реле напряжения УАВР может подействовать с замедлением, достигающим $t_{\text{с.р}} = 1$ с и более. Такое замедление нежелательно. Избежать его можно, если вместо минимального реле напряжения использовать реле понижения частоты. Это возможно, так как снижается не только значение, но и частота остаточного напряжения, причем время снижения частоты до значения уставки срабатывания, равной 46—47 Гц, обычно не превышает 0,2—0,3 с, т. е. всегда значительно меньше, чем время снижения остаточного напряжения от первоначального значения до уставки срабатывания минимального реле напряжения. Схемы пусковых органов с реле частоты рассмотрены, например, в [57]. Действие устройства АВР имеет смысл при наличии напряжения на резервном источнике питания. Поэтому в пусковой орган УАВР включают максимальное реле напряжения, контролирующее наличие напряжения на резервном источнике питания, на шинах секции II . При минимальном рабочем напряжении $U_{\text{раб min}}$ реле должно находиться в состоянии после срабатывания, разрешая действие пускового органа УАВР. Это обеспечивается выбором

его напряжения срабатывания по условию

$$U_{с.р2} = U_{раб\ мин} / (k_n k_{отс} K_U), \quad (10.11)$$

где $k_{отс} = 1,5 \dots 1,7$ — коэффициент отстройки; $k_n = 0,8$ — коэффициент возврата.

В расчетах обычно принимают $U_{с.р2} = (0,65 \dots 0,7) (U_{ном} / K_U)$. Требование однократности действия УАВР удовлетворяется, если принять продолжительность воздействия на включение выключателя $Q5$ (рис. 10.11, а)

$$t_{АВР2} = t_{н.в} + t_{зап}, \quad (10.12)$$

где $t_{н.в}$ — время включения выключателя $Q5$; $t_{зап} = 0,3 \dots 0,5$ с.

Включенный от УАВР выключатель должен иметь защиту, действующую с ускорением после АВР. В том случае, если при действии УАВР резервный источник питания перегружается и не обеспечивает самозапуск электродвигателей, следует отключить часть нагрузки, например, минимальной защитой напряжения.

§ 10.7. СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА

Устройства АВР на переменном оперативном токе обычно применяются в установках с выключателями, оборудованными грузовыми или пружинными приводами, имеющими различные вспомогательные контакты, о назначении и условном обозначении которых рассказано выше (см. § 10.2).

На рис. 10.12, а показана подстанция, получающая питание от рабочего источника. Выключатель $Q1$ включен, а выключатель $Q2$ резервного источника отключен. В качестве пускового органа УАВР применено вторичное реле напряжения KVT прямого действия РНВ (рис. 10.12, б). Оно срабатывает при исчезновении напряжения на шинах подстанции и отключает выключатель $Q1$ с заданной выдержкой времени. При этом вспомогательный контакт выключателя $Q1.1$ замыкает цепь электромагнита включения $YAC2$ выключателя $Q2$, который включается лишь при наличии

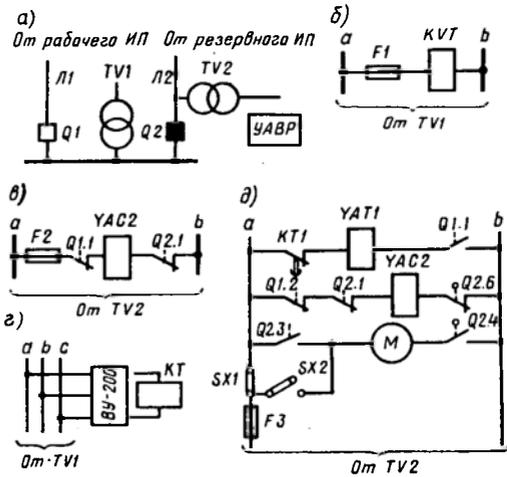


Рис. 10.12. Схемы сети и устройства АВР выключателей с пружинными или грузовыми приводами

напряжения от резервного источника, электромагнит подключается к $TV2$ (рис. 10.12, в).

В качестве пускового органа устройства АВР используют вторичное реле времени KT косвенного действия ЭВ-235К, подключив его к трансформатору напряжения $TV1$ через выпрямительное устройство ВУ-200 (рис. 10.12, з). Реле KT срабатывает при исчезновении напряжения на шинах подстанции и с заданной выдержкой времени замыкает цепь электромагнита отключения $YAT1$ выключателя $Q1$ (рис. 10.12, д). Отключение выключателя сопровождается размыканием его вспомогательного

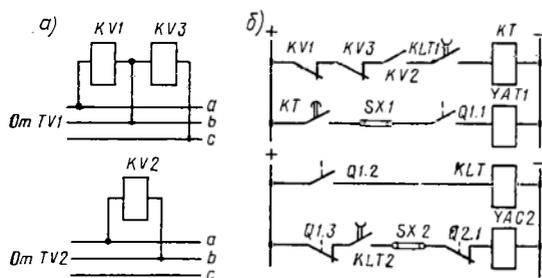


Рис. 10.13. Схема устройства АВР выключателей с электромагнитными приводами

контакта $Q1.1$ и замыканием вспомогательного контакта $Q1.2$ в цепи электромагнита включения $YAC2$ выключателя $Q2$. Выключатель включается лишь при наличии напряжения на резервном источнике и готовности привода к действию (вспомогательный контакт $Q2.6$ замкнут). Вспомогательный контакт $Q2.3$ исключает многократность действия устройства АВР при включении выключателя $Q2$ на устойчивое короткое замыкание. Если выключатель отключается после включения устройством АВР, то пружина электродвигателем

M не заводится, так как его цепь разомкнута вспомогательным контактом $Q2.3$. Для подготовки привода к действию накладку $SX1$ снимают (выводят из действия АВР), а накладкой $SX2$ замыкают цепь электродвигателя, который, начиная работать, заводит пружину до тех пор, пока его цепь не разомкнется вспомогательным контактом $Q2.4$. После завода накладки возвращают в прежнее положение. Если на резервной линии отсутствует трансформатор напряжения $TV2$, то схему АВР можно выполнить с использованием предварительно заряженных конденсаторов.

Устройства АВР на постоянном оперативном токе применяют в установках, имеющих выключатели с электромагнитными приводами, электромагниты отключения и тем более электромагниты включения которых потребляют сравнительно большие мощности. При этом схемы релейной защиты и схемы автоматики выполняют на постоянном или выпрямленном оперативном токе с использованием блоков питания и мощных выпрямительных устройств (рис. 10.13).

Пусковой орган УАВР содержит минимальные реле напряжения KVI , $KV3$ и максимальное реле напряжения $KV2$ (рис. 10.13, а). Выдержку времени t_{ABP1} создает реле времени KT (рис. 10.13, б). Однократность действия обеспечивается промежуточным реле KLT , имеющим при возврате выдержку времени t_{ABP2} . В нормальном режиме выключатель $Q1$ включен, а выключатель $Q2$ отключен. На шинах и на линии $L2$ имеется напряжение (см. рис. 10.12, а). Контакты минимальных реле напряжения KVI и $KV3$ разомкнуты, а контакт максимального реле напряжения $KV2$ замкнут. Вспомогательные контакты $Q1.1$ и $Q1.2$ выключателя $Q1$

замкнуты, а вспомогательный контакт $Q1.3$ разомкнут. При этом реле KLT находится в возбужденном состоянии и его контакты $KLT.1$ и $KLT.2$ замкнуты. Вспомогательный контакт $Q2.1$ выключателя $Q2$ замкнут; цепь электромагнита включения $УАС2$ подготовлена.

Устройство АВР действует следующим образом. При исчезновении напряжения на шинах подстанции срабатывают реле $KV1$ и $KV3$, их контакты в цепи реле времени KT замыкаются. Если на линии $L2$ имеется напряжение, то реле $KV2$ находится в состоянии после срабатывания, его контакт замкнут. Реле времени KT приходит в действие и по истечении времени $t_{\text{АВР1}}$ замыкает контакт в цепи электромагнита отключения $УАТ1$, выключатель $Q1$ отключается, При этом его вспомогательные контакты $Q1.1$ и $Q1.2$ размыкаются, а $Q1.3$ в цепи электромагнита включения $УАС2$ замыкается, производя включение выключателя $Q2$. Если включение происходит на поврежденные шины, то защита выключателя (на схеме не показана) с ускорением после действия $УАВР$ отключает его. Повторного включения не последует, так как к этому времени реле KLT размыкает свои контакты $KLT.1$ и $KLT.2$.

§ 10.8. ТРЕБОВАНИЯ, ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ И ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ

Требования к устройствам. Частота переменного тока определяется угловой частотой вращения синхронных генераторов и является одним из основных показателей качества электроэнергии. Отклонение частоты в нормальных режимах от номинального значения $f_{\text{ном}}=50$ Гц не должно превышать $\Delta f=\pm 0,1$ Гц. Допускается кратковременное отклонение частоты не более чем на $\Delta f=\pm 0,2$ Гц. Частота в энергосистеме поддерживается персоналом или автоматически путем изменения впуска пара в турбины турбогенераторов и воды в турбины гидрогенераторов.

При установившейся частоте активная мощность P_r , вырабатываемая генераторами, равна активной мощности P_n , потребляемой нагрузкой. Успешное регулирование частоты тока возможно при наличии в энергосистеме резерва активной мощности, т. е. до тех пор, пока генераторы будут загружены не полностью. При отсутствии в системе резерва активной мощности отключение части генераторов или включение новых потребителей сопровождается снижением частоты. Длительная работа с пониженной частотой ($f < 48$ Гц) недопустима, так как при этом снижается скорость вращения электродвигателей, вследствие чего падает их производительность. На промышленных предприятиях это приводит к нарушению технологии производства и браку, а на электрических станциях — к снижению вырабатываемой генераторами мощности и их ЭДС. Дефицит активной мощности увеличивается и возникает дефицит реактивной мощности, что может привести не только к аварийному снижению частоты (лавина частоты), но и к лавинообразному снижению напряжения (лавина напряжения) и разрушению всей системы электроснабжения.

В таких случаях для восстановления заданного режима работы автоматически отключают часть наименее ответственных потребителей с помощью устройств автоматической частотной разгрузки (УАЧР). Принципиально УАЧР может выполняться реагирующим не только на изменение абсолютного значения частоты, но и на скорость ее изменения. Устройством, реагирующее на скорость изменения частоты, обладает некоторыми преимуществами, однако из-за сложности широкого применения не находит.

Устройства АЧР должны удовлетворять ряду требований. Основные из них следующие [78]:

обеспечивать нормальную работу энергосистемы независимо от дефицита активной мощности, характера причин, вызывающих снижение частоты; не допускать даже кратковременного снижения частоты ниже $f=45$ Гц; продолжительность работы с частотой $f < 47$ Гц не должна превышать 20 с, а с частотой $f < 48,5$ Гц — 60 с;

обеспечивать отключение потребителей в соответствии с возникшим дефицитом мощности и не допускать возникновения лавины частоты и напряжения; при этом последовательность отключений должна быть такая, чтобы в первую очередь отключались менее ответственные потребители; восстанавливать частоту до уровня, при котором энергосистема может длительно работать; дальнейший подъем частоты до номинальной возлагается на дежурный персонал энергосистемы;

если восстановление нормального режима после действия УАЧР возлагается на устройства автоматики, то УАЧР должно обеспечить подъем частоты до уровня, необходимого для их срабатывания;

действовать согласованно с устройствами АПВ и АВР;

не действовать при кратковременных снижениях частоты.

Отключение потребителей устройствами АЧР должно начинаться при снижении частоты до $f=49 \dots 49,2$ Гц. Мощность, отключаемая устройствами АЧР, должна определяться с учетом того, что в общем случае мощность, потребляемая нагрузкой, зависит от частоты и снижается вместе с ней. Это явление называется *регулирующим эффектом нагрузки* и характеризуется коэффициентом

$$k_{р.э.н} = \Delta P_n (\%) / [\Delta f (\%)], \quad (10.13)$$

который принимается равным $k_{р.э.н} = 1,5 \dots 2,5$. Считается, что снижение частоты на $\Delta f = 1\%$ сопровождается уменьшением суммарной нагрузки энергосистемы на $\Delta P_n = 1,5 \dots 2,5\%$.

При дефиците активной мощности в энергосистеме частота снижается до тех пор, пока снова не наступит равенство потребляемой и вырабатываемой генераторами мощностей. Таким образом, снижение активной мощности нагрузки ΔP_n равно дефициту активной мощности P_d . Поэтому выражение (10.13) можно использовать для определения отключаемой мощности $P_{отк}$, необходимой для восстановления частоты при ее снижении от номинального значения $f_{ном} = 50$ Гц до некоторого значения f . При этом

$$\Delta f (\%) = (50 - f) \cdot 100 / 50;$$

$$\Delta P_n (\%) = P_d (\%) = P_{отк} (\%) = P_{отк} \cdot 100 / P_{н. ном},$$

где $P_{н.ном}$ — мощность нагрузки системы электроснабжения при $f=50$ Гц. Подстановкой Δf (%) и ΔP (%) в (10.13) определяется

$$P_{отк} = (50 - f) k_{р,э.н} P_{н.ном} / 50. \quad (10.14)$$

Выполнение и выбор параметров УАЧР. Так как дефицит активной мощности при разных авариях может быть самым различным, то нагрузка, отключаемая УАЧР при снижении частоты, должна разбиваться на очереди. Это необходимо для того, чтобы избежать отключения лишних потребителей при малых дефицитах активной мощности. Отключаемая нагрузка и количество очередей должны быть такими, чтобы частота в энергосистеме восстанавливалась до номинальной. Применяются две основные категории автоматической частотной разгрузки: УАЧР I и УАЧР II.

Устройство АЧР I быстродействующее с единой для всех ее очередей выдержкой времени, не превышающей $t_{АЧР I} = 0,3$ с, и с разными уставками срабатывания по частоте от $f_{с.р I} = 49 \dots 49,2$ Гц до $f_{с.р n} = 46,5$ Гц.

Частота срабатывания последующей очереди $f_{с.р n}$ меньше частоты срабатывания предыдущей очереди $f_{с.р (n-1)}$ на ступень селективности по частоте Δf_c .

Минимально допустимая ступень селективности $\Delta f_c = 0,1$ Гц. Таким образом, УАЧР I может содержать более двадцати очередей. Так как уставки срабатывания очередей УАЧР I различаются лишь на $\Delta f_c = 0,1$ Гц, то возможна и допускается неселективная работа соседних очередей.

Мощность потребителей, подключаемых к устройствам АЧР I в соответствии с рекомендациями [78],

$$P_{АЧР I} \geq \Delta P_{л} - \Delta P_{р} + 0,05, \quad (10.15)$$

где $\Delta P_{л}$ — дефицит генерируемой мощности; $P_{р}$ — резерв активной мощности на тепловых электростанциях, находящихся в работе.

Все величины в выражении (10.15) указаны в относительных единицах, причем за базисную мощность принята потребляемая мощность энергосистемы (района) в исходном режиме до возникновения дефицита мощности. Назначение УАЧР I — сдерживать снижение частоты в первое время развития аварии, не допускать даже кратковременного опускания ее ниже 45 Гц.

Устройство АЧР II также состоит из очередей, однако с одинаковой уставкой по частоте $f_{АЧР II} = 49$ Гц (иногда несколько выше, но не более $f_{АЧР II} = 49,2$ Гц); они отличаются друг от друга выдержками времени. Минимальная уставка по времени принимается равной $t_{с.р I} = 5 \dots 10$ с, а максимальная $f_{с.р n} = 60 \dots 90$ с. Ступень селективности принимается $\Delta t_c = 3$ с.

Если за указанное время действием УАЧР I частоту восстановить не удастся и она устанавливается (зависает) на недопустимо низком уровне (48 Гц и ниже), то начинают срабатывать очереди УАЧР II и с соответствующими выдержками времени отключают

дополнительную нагрузку. Суммарная нагрузка, подключенная к УАЧРІІ, в относительных единицах [78]

$$P_{\text{АЧРІІ}} \geq 0,4 P_{\text{АЧРІ}} \quad (10.16)$$

Определенные по (10.15) и (10.16) мощности нагрузки распределяются равномерно по очередям так, чтобы более ответственные потребители были подключены к очередям УАЧРІ с более низкими уставками по частоте и к очередям УАЧРІІ с более высокими уставками по времени. Достичь строго равномерного распределения мощности по очередям на практике не удается. Имеются рекомендации по совмещению действия устройств АЧРІ и АЧРІІ, при котором одна и та же нагрузка подключается к очередям того и другого устройства. При этом, в частности, уменьшается суммарная мощность нагрузки, подлежащей отключению.

Наряду с указанными категориями УАЧР в эксплуатации применяют еще *дополнительную (местную) автоматическую разгрузку*. Необходимость в этой категории автоматической разгрузки возникает, когда район, получая основное питание от энергосистемы, не имеет достаточного резерва активной мощности. Местная частотная разгрузка позволяет сохранить питание наиболее ответственных потребителей района при нарушении связи района с энергосистемой. После восстановления частоты повторное включение потребителей должно производиться, как правило, автоматически. Для этой цели используются имеющиеся на присоединениях устройства АПВ, дополненные реле повышения частоты. Они получили название *устройства частотного АПВ (УЧАПВ)*. Действие УЧАПВ разрешается при восстановлении частоты, что фиксируется замыканием контактов реле частоты. Уставка реле принимается $f_{\text{с.р}} = 49,5 \dots 50$ Гц. Минимальная выдержка времени на включение устанавливается $t_{\text{АПВ}} = 10 \dots 20$ с, а ступень селективности $\Delta t_{\text{с}} = 5$ с.

§ 10.9. СХЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ И ЧАСТОТНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ПОВТОРНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Имеются различные схемы устройств АЧР и ЧАПВ [78]. Простейшие из них позволяют выполнить одну очередь УАЧРІ или одну очередь УАЧРІІ с последующим ЧАПВ. В сложных схемах осуществляется автоматическое переключение уставок реле частоты и тем самым с помощью одного реле выполняется несколько очередей АЧР, создается совмещенная очередь, когда отключение одних и тех же присоединений производят и УАЧРІ и УАЧРІІ с последующим ЧАПВ.

На рис. 10.14, *а* показана возможная схема устройства АЧРІІ. Реле частоты *KF* (рис. 10.14, *в*) срабатывает при снижении частоты до уставки и своим контактом *KF* замыкает цепь реле време-

ни *КТ* (рис. 10.14, а), которое с заданной выдержкой времени по-дает сигнал на срабатывание промежуточного реле *KL*. Контакта-ми реле *KL.1—KL.3* (рис. 10.14, б) отключаются выключатели, а контактом *KL.4* осуществляется запрет АПВ. На рис. 10.14, г по-казана схема одной очереди УАЧРП с устройством частотного АПВ. В устройстве ЧАПВ можно использовать типовое реле РПВ-358 (на рисунке не показа-но).

В этой схеме, как и в пре-дыдущей (рис. 10.14, а), отклю-чения производятся контактами *KL.1.1, KL.1.2* (рис. 10.14, б), после того как реле времени *КТ* замкнет контакт *КТ.2* и срабаты-ют реле *KL.1* и *KL.2*, при этом контакты *KL.2.2* и *KL.2.3* размы-кают цепи пуска УАПВ (рис. 10.14, е), запрещая повторное включение, а контакт *KL.2.1* размыкает цепь обмотки реле *KL.3* (рис. 10.14, г), которое, возвра-щаясь с замедлением $t_{н.р} = 0,8 \dots 1,0$ с, размыкает цепь обмотки ре-ле *KL.1* и снимает отключающее воздействие на выключатели. Авто-матическое повторное вклю-чение происходит только после вос-становления частоты до значения, при котором реле частоты размы-кает контакт *KF* и реле *KL.2* воз-вращается в исходное состояние. Термическая стойкость реле вре-мени *КТ* при длительных сниже-ниях частоты достигается автома-тическим вводом резистора *R* в цепь обмотки реле времени при его срабаты-вании.

Обычно автоматическое повторное включение разрешается при частоте более высокой, чем частота срабатывания УАЧР. Для этого реле частоты автоматически переключается на уставку воз-врата, соответствующую уставке устройства ЧАПВ. В рассмотрен-ной схеме это переключение можно осуществить при срабатывании реле времени *КТ*.

Устройства АЧР и ЧАПВ применяются и в сетях напряжением 6—10 кВ на присоединениях с выключателями с пружинными и грузовыми приводами. В основу УАЧР с ЧАПВ можно положить любую из рассмотренных выше (см. § 10.2 и рис. 10.1) схем УАПВ. Простейшая схема УАЧРП одной очереди с переключением реле частоты на уставку ЧАПВ показана на рис. 10.15. Для ее выпол-нения принята схема УАПВ с выдержкой времени (см. рис. 10.1, в).

Схема работает следующим образом. При снижении частоты до уставки срабатывания реле частоты *KF* контактом *KF* замыкает цепь реле времени *КТ.1*, которое приходит в действие и мгновенным замыкающим контактом *КТ.1.1* из-

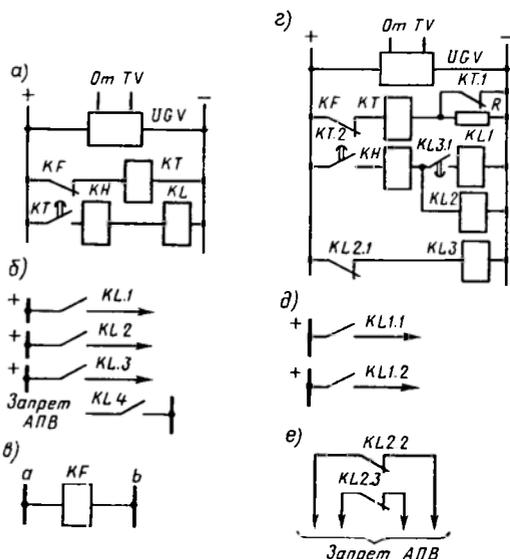


Рис. 10.14. Схемы устройств АЧР и ЧАПВ на выпрямленном оперативном токе

меняет уставку реле частоты, а мгновенным размыкающим контактом $KT1.2$ вводит в цепь обмотки резистор $R3$, обеспечивая термическую стойкость обмотки. По истечении заданной выдержки времени замыкается контакт $KT1.3$ реле времени и срабатывает реле KL . Его контакт $KL.1$ в цепи электромагнита YAT замыкается, а контакт $KL.2$ в цепи пуска реле времени $KT2$ размыкается. При этом выключатель отключается, а устройство АПВ оказывается выведенным из действия. В таком состоянии схема находится до тех пор, пока частота не восстанавливается до измененной уставки возврата реле частоты KF . Возврат реле частоты приводит к возврату промежуточного реле KL и к замыканию его контакта $KL.2$. При этом реле времени $KT2$ по истечении выдержки времени $t_{АПВ}$ замыкает контакт $KT2$ в цепи электромагнита включения YAC , выключатель включается. Отключение выключателя защитами не сопровождается запретом АПВ и схема действует обычно. В схемах УАЧР и УЧАПВ используют рассмотренные выше реле РЧ-1 (см. § 3.4).

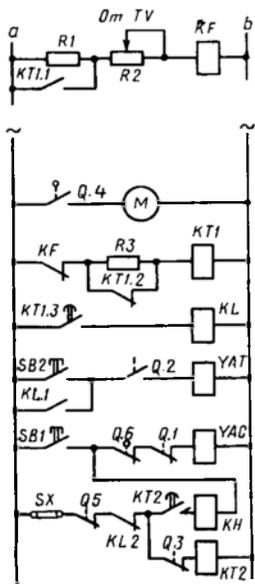


Рис. 10.15. Простейшая схема одной очереди АЧРП с переключением реле частоты на уставку ЧАПВ

§ 10.10. УСТРОЙСТВА АВТОМАТИКИ ДЕЛЕНИЯ

В системах электроснабжения устройства автоматики деления (УАД) в зависимости от режима работы сети применяются для следующих целей:

- ликвидации асинхронного режима; предотвращения опасной перегрузки отдельных элементов системы электроснабжения обеспечения селективной работы релейной защиты;

- прекращения подпитки места короткого замыкания;

- предотвращения включения резервного источника питания на короткое замыкание при действии сетевого УАВР.

В зависимости от назначения УАД его схемы выполняются по-разному [79]. Рассмотрим некоторые из них.

Устройство АД для ликвидации асинхронного режима. Асинхронный режим характерен, в частности, увеличением тока во всех трех фазах, поэтому простейшее устройство АД можно выполнить с помощью трех реле тока, включенных на фазные токи. Контакты реле соединяются последовательно, чем исключается действие устройства при несимметричных коротких замыканиях. Для повышения чувствительности в схему вводят минимальные реле напряжения. Недостатком устройства является возможность его излишнего срабатывания при трехфазных коротких замыканиях. Если это недопустимо, то в схему включают реле времени для создания выдержки времени $t_{УАД}=0,4$ с или предусматривают различные блокировки.

Устройство АД для предотвращения включения на к.з. резервного источника питания при действии сетевого УАВР. Это устройство выполняют так, что оно приходит в действие при исчезновении напряжения на контролируемом элементе системы электроснабжения, например на шинах источника питания. Поэтому в качестве пусковых органов устройства используют минимальные реле напряжения. Действие УАД согласуют с действием других устройств автоматики. Для этого в его схему вводят реле времени. Одна из возможных схем УАД показана на рис. 10.16. Контакты минимальных реле напряжения $KV1$ и $KV2$ в нормальном режиме замыкают цепь реле времени KT , например ЭВ-245, при этом якорь реле втянут, пружина заведена и реле подготовлено к действию. При исчезновении напряжения реле $KV1$ и $KV2$ размыкают контакты и снимают напряжение с обмотки реле KT , которое приходит в действие и с заданной выдержкой времени подключает электромагнит отключения УАТ выключателя к предварительно заряженному конденсатору C . Выключатель отключается. Рассмотренное устройство является по существу минимальной защитой напряжения.

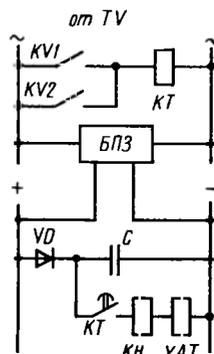


Рис. 10.16. Принципиальная схема устройства автоматики деления

§ 10.11. СОГЛАСОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВ АВР, АПВ, АЧР И АД

Эффективность от внедрения устройств АВР, АПВ, АЧР и АД обеспечивается, если их действия будут между собой согласованы. Так, например, согласованием выдержек времени УАВР, УАПВ и УАД, установленных в разных точках сети, можно сохранить питание наибольшего числа потребителей при отключении поврежденного элемента в системе электроснабжения. Действие УАЧР имеет смысл и разгрузка возможна, если отключенные потребители не включаются повторно устройствами АПВ, а устройства АВР не восстанавливают их питание от тех же источников. Действие УАПВ и УАВР необходимо согласовать так, чтобы при повреждении любой из линий и отключении ее соответствующей защитой устройства автоматики попытались восстановить электроснабжение потребителей от своего источника питания. Это значит, что первым после отключения линии должно действовать УАПВ и только после его неуспешного действия потребители устройством АВР подключаются к резервному источнику питания. Рассмотрим несколько примеров.

Согласование действия УАЧР, УАВР и УАПВ. На рис. 10.17, а показана распределительная сеть; распределительные пункты

РП1—РП3 связаны с источником *ИП* питающими линиями *Л2—Л3*; кольцо разомкнуто выключателями *Q1* и *Q2*, оборудованными устройствами *АВР—УАВР1, УАВР2* одностороннего действия, обеспечивающими резервное питание распределительных пунктов *РП1* и *РП2* по линии *Л3*. На питающих линиях установлены устройства *АЧР—УАЧР1—УАЧР2* и устройства частотного *АПВ—УЧАПВ1—УЧАПВ3*. Для согласованного действия автоматики необходимо, чтобы резервная линия *Л3* имела *УАЧР* той же или бо-

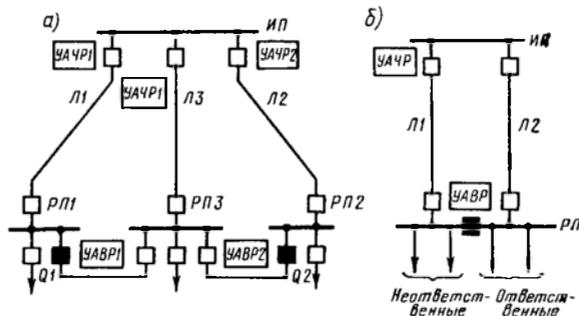


Рис. 10.17. Схемы распределительных сетей с устройствами *АВР, АПВ* и *АЧР*

лее ранней очереди, чем рабочие линии *Л1* и *Л2*. Согласованное действие обеспечивается, если на линиях *Л1* и *Л3* установить *УАЧР1* первой очереди, а на линии *Л2* — *УАЧР2* второй очереди. В этом случае при действии автоматической частотной разгрузки *УАВР1* и *УАВР2* не срабатывают, так как резервное питание отключается одновременно с рабочим (линии *Л1* и *Л3*) или раньше рабочего (линии *Л2* и *Л3*). Для исключения ненужных срабатываний устройств *АВР* при восстановлении нормальной схемы резервная линия должна включаться последней. Это необходимо учитывать при выборе выдержек времени *УЧАПВ*.

Перерывы электроснабжения при автоматической частотной разгрузки всегда приводят к экономическому ущербу. При снижении частоты и действии *УАЧР* желательно сохранить питание ответственных потребителей. Для этого ответственные нагрузки выделяют на отдельные питающие линии так, как это показано, например, на рис. 10.17, б. Согласованное действие автоматики и надежное электроснабжение ответственных потребителей обеспечиваются при установке на линии *Л1* устройства *АЧР*, а на секционном выключателе — устройства *АВР* одностороннего действия, обеспечивающего резервирование только ответственных нагрузок. Следует иметь в виду, что ответственные потребители предприятия обычно рассредоточены по питающим линиям. Для перевода на одну линию, как правило, требуется проведение больших работ, связанных с экономическими затратами. В ряде случаев они могут

оказаться совершенно неоправданными. Обычно нежелателен также перенос устройства АЧР непосредственно на объекты потребителя, так как при этом требуются дополнительные затраты и ухудшается контроль со стороны энергосистемы за работой этих устройств.

Согласование действия релейной защиты, УАПВ, УАД и УАВР. Сельские распределительные сети 6—10 кВ характеризуются большой протяженностью и рассредоточением нагрузок с электроприемниками первой и второй категорий. Основным способом повышения надежности таких сетей является автоматическое сек-

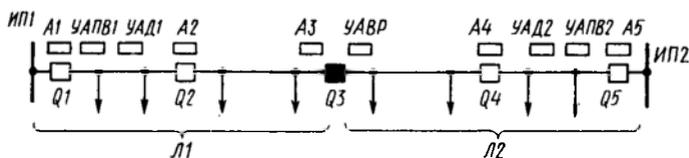


Рис. 10.18. Схема распределительной сети с двусторонним питанием с устройствами АПВ, АВР и АД

ционирование и резервирование линий 6—10 кВ [80]. Путем секционирования линия делится на несколько участков с помощью коммутационной аппаратуры, а при наличии второго источника питания предусматривается устройство сетевого АВР (рис. 10.18). При этом эффективность УАВР достигается только при наличии в такой сети других устройств автоматики, обеспечивающих автоматическое повторное включение, отключение секционирующего аппарата, перестройку параметров релейной защиты и др. В конечном счете эти устройства вместе с релейной защитой должны обеспечить электроснабжение наибольшего числа потребителей при различных аварийных ситуациях. В схеме рис. 10.18 сети все потребители линии Л1 в нормальном режиме подключены к источнику питания ИП1, а потребители линии Л2 — к ИП2. Линия Л1 секционирована выключателем Q2, а линия Л2 — выключателем Q4. На линиях установлены максимальные токовые защиты А1 и А5 и устройства УАПВ1 и УАПВ2. Выключатель Q3 в пункте резервирования оборудован максимальной токовой защитой А3 и устройством УАВР двустороннего действия, включающим выключатель Q3 при исчезновении напряжения в пункте резервирования со стороны линии Л1 или со стороны линии Л2. При этом вся сеть или часть ее питается либо от источника ИП2, либо от источника ИП1.

Рассмотрим выбор параметров и взаимодействие устройств автоматики и релейной защиты при различных аварийных ситуациях.

Исчезновение напряжения на шинах источников питания ИП1 или ИП2. При исчезновении напряжения на

шинах источника *ИП1* исчезает также напряжение на линии *Л1* и устройство АВР подействует на включение выключателя *Q3*. В этом случае все потребители линии *Л1* получают питание от резервного источника *ИП2*. Однако при этом возможно включение источника *ИП2* на поврежденный элемент рабочего источника *ИП1*. Для исключения этого необходимо перед действием УАВР отключить линию *Л1* выключателем *Q1* от рабочего источника питания *ИП1*. Устройство АВР выполнить это не может, так как выключатель *Q1* удален от пункта резервирования. Для этого выключатель *Q1* оборудуется устройством автоматики деления (УАД1), которое можно выполнить в виде минимальной защиты напряжения (см. рис. 10.16). Напряжение срабатывания минимальных реле напряжения УАД принимается не менее чем на 10% выше напряжения срабатывания аналогичных реле устройства АВР (см. § 10.6), а выдержка времени выбирается из условия несрабатывания его при к.з. на линии *Л1* и действии УАПВ. В случае однократного АПВ это условие обеспечивается при

$$t_{\text{УАД}} \geq t_{\text{с.з. max}} + t_{\text{АПВ1}} + t_{\text{зап}} \quad (10.17)$$

При исчезновении напряжения на шинах источника *ИП2* исчезает также напряжение на линии *Л2*, устройство УАВР включает выключатель *Q3* и все потребители линии *Л2* подключаются к источнику питания *ИП1*. Для отключения выключателя *Q5* перед действием УАВР на выключателе *Q5*, как и на выключателе *Q1*, предусматривается устройство автоматики деления (УАД2). Его параметры выбирают так же, как и параметры УАД1. При этом выдержки времени этих устройств могут иметь разное значение. Поэтому время срабатывания $t_{\text{АВР1}}$ выбирается отдельно для случая действия УАВР в одну и в другую стороны. И в том, и в другом случае должно выполняться условие $t_{\text{АВР1}} \geq t_{\text{УАД}} + t_{\text{зап}}$ наряду с условиями, изложенными в § 10.6. Для получения двух выдержек времени в схему УАВР включают два реле времени [79]. Одно из них приходит в действие при срабатывании минимальных реле напряжения, контролирующих напряжение в пункте резервирования со стороны линии *Л1*, а второе — при срабатывании аналогичных реле, контролирующих напряжение со стороны линии *Л2*.

Короткие замыкания на любом из участков линии. Селективное отключение поврежденного участка при любой схеме сети возможно, если на секционирующих выключателях *Q2* и *Q4* предусмотрено одно из следующих устройств:

направленная или ненаправленная токовая защита с автоматическим изменением параметров срабатывания, например выдержки времени;

устройство автоматики деления и токовая защита.

При изменении схемы сети в результате действия АВР удаленность отдельных участков сети от источника питания меняется. В связи с этим не представляется возможным выбрать по ступен-

чтотому принципу выдержки времени t_2, t_3, t_4 соответственно защит $A2, A3, A4$. В самом деле, при питании всей сети от источника $ИП1$ должно выполняться условие $t_4 < t_3 < t_2$, а при питании от источника $ИП2$ для селективного действия необходимо иметь $t_4 > t_3 > t_2$. Эти противоречивые требования можно удовлетворить, если защиты $A2$ и $A4$ выполнить направленными или автоматически изменить их выдержки времени при изменении схемы сети. Одной из таких защит является рассмотренная выше максимальная токовая направленная защита типа $ЛТЗ$ (см. § 6.3).

Выдержку времени токовой защиты можно автоматически изменять и без использования реле направления мощности, например с помощью минимальной защиты напряжения. Защита срабатывает при исчезновении напряжения на линии и с выдержкой времени, выбранной по условию (10.17), изменяет выдержку времени токовой защиты. Вместо этих защит в ряде случаев используют устройство автоматики деления (минимальную защиту напряжения) и максимальную токовую защиту, предназначенную только для действия, когда каждая линия подключена к своему источнику питания. Защита отключает выключатель $Q2(Q4)$ при повреждении на участке, прилегающем к пункту резервирования, а головной участок остается в работе. Для достижения этого достаточно иметь $t_1 > t_2$ и $t_5 > t_4$.

При повреждении на головном участке и неуспешном АПВ напряжение у места установки секционирующего выключателя исчезает и он отключается устройством автоматики деления. Вслед за этим действует УАВР и прилегающий к пункту резервирования участок подключается к резервному источнику питания. В данном случае, очевидно, нет необходимости иметь устройства автоматики деления на выключателях $Q1$ и $Q5$, так как при исчезновении напряжения на шинах источников питания отключаться будут и секционирующие выключатели своими устройствами автоматики деления. В этом недостаток этого способа достижения селективности, так как головные участки отключаются и при отсутствии на них повреждения. Условия же выбора параметров и согласования действия УАПВ, УАВР и УАД остаются такими же, как и для случая установки УАД на головных выключателях $Q1$ и $Q5$.

§ 10.12. УСТРОЙСТВА СИСТЕМНОЙ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ

Линии электропередачи с двусторонним питанием являются одним из основных элементов энергосистем. Они используются для передачи электроэнергии от электрических станций в энергосистему и обеспечивают межсистемные связи. Устройства релейной защиты и автоматики таких линий должны обеспечить статическую и динамическую устойчивость электропередачи и недопущение асинхронного режима. Нарушение устойчивости может произойти

из-за опасных перегрузок электропередачи, вызванных внезапными отключениями генераторов, нагрузки и параллельных линий. Причиной нарушения устойчивости могут также быть затыжения короткие замыкания, кратковременные неполнофазные режимы. Нарушениями нормальных режимов работы являются и опасные повышения напряжения, вызванные односторонним отключением протяженных линий электропередачи и опасные повышения частоты.

Рассмотренные выше устройства защиты и автоматики обычно не позволяют предотвратить нарушения устойчивости и опасные повышения частоты и напряжения при возникновении указанных режимов работы. Для этой цели предусматриваются специальные автоматические устройства, называемые *устройствами противоаварийной автоматики (УПА)*. Они должны объединить все устройства, предназначенные для действия при аварийных ситуациях, в том числе релейную защиту и автоматику общего назначения. Обычно же под УПА понимают специальные устройства, которые должны обеспечивать: предотвращение нарушения статической и динамической устойчивости; предотвращение асинхронного режима или его ликвидацию в случаях нарушения устойчивости; предотвращение опасного повышения частоты и напряжения.

Требования к устройствам противоаварийной автоматики и их принципы действия. Нарушение устойчивости работы электропередачи и аварийное разделение системы на несинхронно работающие части может сопровождаться образованием значительного дефицита мощности, перегрузкой и отключением агрегатов электрических станций и прекращением в конечном счете электроснабжения потребителей. Для предупреждения или ограничения этих быстро протекающих процессов устройства противоаварийной автоматики (УПА) должны быть быстродействующими и удовлетворять требованиям селективности, чувствительности и надежности. Кроме того, в зависимости от интенсивности воздействия УПА должны обеспечивать соответствующую дозировку воздействия.

Перегрузка линии сопровождается увеличением передачи активной мощности и связанного с ней угла между ЭДС генераторов электростанции и энергосистемы. Поэтому пусковой орган УПА может быть основан на принципе контроля активной мощности или соответствующего ей угла между векторами напряжений по концам рассматриваемой линии. Перегрузка линии может явиться следствием отключения, например, других линий. В этом случае пусковой орган автоматики, предотвращающий нарушения устойчивости, выполняют на основе выявления и фиксации отключения линии.

Признаками асинхронного режима являются: периодическое изменение угла $0 \leq \delta \leq 2\pi$ между ЭДС генераторов электростанции и энергосистемы; периодические с частотой скольжения изменения тока во всех элементах и напряжения во всех точках электропередачи; периодические с двойной частотой скольжения изменения

активной мощности. УПА, предназначенные для ликвидации асинхронного режима, можно выполнить на принципе контроля указанных электрических величин. В пусковых органах УПА, предотвращающих опасные повышения частоты и напряжения, используют измерительные реле частоты и напряжения.

Устройства противоаварийной автоматики для предотвращения нарушения устойчивости. Устройства, контролирующие активную мощность. Измерительным органом этого устройства является комплект максимальных реле активной мощности, в котором используются одно или три однофазных реле с включением на фазный ток и соответствующее фазное напряжение. Однако такое устройство может сработать ложно при несимметричных коротких замыканиях, поэтому при наличии только одного реле мощности в схему вводят реле напряжения, включенное на фильтр напряжения обратной последовательности, и реле тока, включенное на фильтр тока нулевой последовательности. Такое УПА выводится из действия при срабатывании одного из указанных дополнительных реле. В схемах с тремя реле мощности логическая часть схемы выполняется так, что устройство сможет сработать только при срабатывании всех трех реле.

В ряде случаев для исключения срабатывания устройства при кратковременных неопасных увеличениях активной мощности в линии электропередачи в схему вводят реле времени с выдержкой времени $t_{\text{УПА}} = 0,5 \dots 1,0$ с. В качестве устройства, контролирующего активную мощность, можно использовать комплектное устройство типа УПА1, выпускаемое отечественной промышленностью. При срабатывании устройство производит дозированную разгрузку линии электропередачи за счет разгрузки паровых турбин, отключения генераторов и части нагрузки, деления энергосистемы.

Устройство, контролирующее угол δ . Измерительным органом УПА, контролирующего угол между векторами напряжения по концам линии, является реле разности фаз напряжений. Напряжение с противоположного конца линии подводится к реле специальным устройством телемеханики. Известны, однако, схемы, не требующие передачи напряжения; его получают непосредственно в месте включения реле с помощью модели линии.

Устройство, выявляющее и фиксирующее факт отключения линий. Отключение линии характеризуют следующие признаки: действие релейной защиты, отключение выключателя по любым причинам, исчезновение активной мощности в линии, исчезновение тока или мощности в одной из параллельных линий. Эти признаки используют для пуска УПА. Так, например, при действии релейной защиты пуск можно осуществить выходным промежуточным реле защиты.

Устройства для ликвидации асинхронного режима. Асинхронный режим представляет опасность в связи со значительными понижениями напряжения, сопровождающимися протеканием больших токов и колебанием активной мощности, поэтому продолжительность асинхронного режима не должна превышать 15—30 с. В пусковых органах таких устройств используются измерительные реле тока, напряжения и сопротивления. На основе измерительных реле тока и напряжения можно выполнить устройство, действующее в первом цикле асинхронного режима (см. § 10.10).

На основе такого пускового органа можно выполнить устройство со счетчиками циклов асинхронного режима, срабатывающее после определенного цикла асинхронного хода.

Асинхронный режим, как и короткое замыкание, сопровождается возрастанием тока и понижением напряжения. Однако скорость изменения этих величин при асинхронном режиме значительно меньше, чем при коротком замыкании. Поэтому асинхронный режим может быть выявлен по скорости изменения сопротивления, измерительным реле сопротивления, включенным на ток линии и напряжение шин. Для этого в схему включают два реле сопротивления — чувствительное и грубое — и реле времени. Характеристики срабатывания реле со-

противления и выдержку времени реле времени выбирают так, что устройство действует только при асинхронном режиме в его первом цикле. Подробные сведения об устройствах противоаварийной автоматики приводятся, например, в [57].

Глава 11

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

§ 11.1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ, НАЗНАЧЕНИЕ И ВЫПОЛНЕНИЕ ЗАЩИТЫ СЕТЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Наиболее распространенной электрической сетью напряжением до 1 кВ является четырехпроводная сеть с глухозаземленной нейтралью. В такой сети основными видами повреждения являются короткие замыкания между фазами и отдельных фаз на землю. Корпуса электродвигателей и другого электрооборудования, присоединенного к четырехпроводной сети, соединяются с заземленной нейтралью, при этом повреждение изоляции оборудования и замыкание фазы на корпус приводят к однофазному короткому замыканию.

Следует заметить, что токи однофазного короткого замыкания $I_k^{(1)}$ оказываются значительно меньше токов при трехфазных повреждениях $I_k^{(3)}$. Так, исследования, выполненные Ульяновским политехническим институтом на ряде промышленных предприятий, показали, что для всех практически случаев отношение $I_k^{(3)}/I_k^{(1)} = 2,8 \dots 3,3$. Для воздушных линий опасным видом повреждения является обрыв проводов. По данным, приведенным в [81], около 40% всех повреждений составляет обрыв фазного провода с последующим падением его на землю. Однако при этом контакта с землей может и не быть. В действительности провод может упасть на забор, крышу строения и различные предметы, представляя опасность для людей. Такая неопределенность затрудняет расчет тока повреждения. Он может изменяться в широких пределах, но даже при хорошем контакте провода с землей значение тока повреждения оказывается значительно меньше значения тока трехфазного к.з. Следует заметить, что обрыв нулевого провода также опасен, так как на оборвавшемся проводе имеется потенциал относительно земли, значение которого зависит от степени несимметрии нагрузки, подключенной со стороны замыкания. Характерным для сетей напряжением до 1 кВ является более резкий, чем в сетях высокого напряжения, спад значений токов к.з. по мере удаления места повреждения от источника питания, а также необходимость учета активных сопротивлений всех элементов, входящих в расчетную схему, и сопротивления дуги в месте повреждения. Дополнительные трудности, с которыми приходится встречаться при выполнении защиты, особенно от однофазных к.з., вызваны

однофазными нагрузками, обуславливающими уже в нормальном режиме значительную несимметрию фазных токов и прохождение тока в нулевом проводе.

В соответствии с [3] электрическая сеть напряжением до 1 кВ должна иметь быстродействующую защиту от токов к.з., обеспечивающую требуемую чувствительность и по возможности селективное отключение поврежденного участка. Неселективное отключение допустимо в тех случаях, когда это не приводит к авариям, тяжелым нарушениям технологического процесса, большим убыткам или нарушению нормального обслуживания населения.

К сетям, которые наряду с защитой от короткого замыкания должны иметь защиту от перегрузки, относятся все сети внутри помещений, выполненные открыто проложенными незащищенными изолированными проводами с горючей оболочкой. Защита от перегрузки необходима для того, чтобы предотвратить перегрев проводников, который мог бы привести к загоранию изоляции и пожару. Защиту от перегрузки должны иметь некоторые осветительные и силовые сети внутри помещений, выполненные защищенными проводниками, проводниками, проложенными в трубах, в негораемых строительных конструкциях и др. Во взрывоопасных помещениях и взрывоопасных установках независимо от условий технологического процесса защита от перегрузки необходима для всех видов сетей. Сети напряжением до 1 кВ выполняют в виде радиальных, магистральных и смешанных схем с односторонним питанием. В таких сетях основной защитой является токовая. Для ее выполнения используют плавкие предохранители и автоматические выключатели, снабженные устройствами токовой защиты, причем предпочтение отдается плавким предохранителям, если нет необходимости в устройствах АПВ и АВР, не требуется обеспечить более быстрое по сравнению с плавкими предохранителями восстановление питания и применение предохранителей в качестве защиты от перегрузки оказывается более экономически эффективным. Для обеспечения требуемых быстродействия, чувствительности и селективности допускается применение специальных защит. В этом случае в качестве коммутационного аппарата может быть использован контактор или управляемый предохранитель. Из средств автоматики рекомендуются только устройства АВР, обеспечивающие требуемую надежность электроснабжения потребителей первой категории.

§ 11.2. ЗАЩИТА ПЛАВКИМИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

Плавкая вставка предохранителя является простейшей токовой защитой с зависимой характеристикой выдержки времени. Она должна защищать элемент электроустановки от токов к.з. и от длительной перегрузки, если этого требует характер электрической сети. При этом надежная работа предохранителя обеспечи-

ваются, если номинальный ток отключения предохранителя $I_{\text{пр.откл}}$ больше максимального расчетного тока к. з. $I_{\text{к макс}}$, проходящего в защищаемом элементе, а номинальное напряжение предохранителя $U_{\text{пр.ном}}$ равно номинальному напряжению сети, в которой он установлен. Плавкая вставка предохранителя не должна перегорать в нормальном режиме работы и при кратковременных перегрузках защищаемого элемента электроустановки.

Плавкие предохранители применяются в электрических сетях с различным характером нагрузки. Нагрузка может иметь постоянный характер без значительного увеличения тока при ее включении (освещение, асинхронные двигатели с фазным ротором). Бывают и такие нагрузки, характер которых вызывает кратковременные перегрузки элементов, защищаемых плавкими предохранителями. Кратковременные перегрузки могут возникать в результате пуска или самозапуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, технологических перегрузок механизмов и по другим причинам, при этом предохранитель перегорать не должен. Однако благодаря кратковременному характеру перегрузки (5—10 с) представляется возможным номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{вс.ном}}$ выбирать меньшим тока перегрузки $I_{\text{пер}}$.

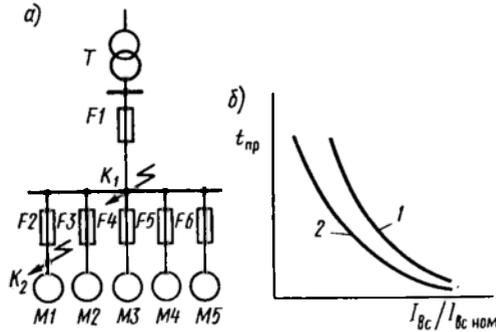


Рис. 11.1. Защита предохранителями радиальной сети с односторонним питанием

Соотношение между током перегрузки и номинальным током плавкой вставки определяется коэффициентом перегрузки $k_{\text{пер}}$, установленным на основании длительного опыта эксплуатации. При этом учитываются условия пуска электродвигателей в защищаемой сети. Различают тяжелые условия пуска, когда производятся частые пуски с большой длительностью разгона (10 с и более), и легкие условия пуска, когда производятся редкие пуски с небольшой длительностью разгона (до 10 с). Для тяжелых условий пуска рекомендуется принимать $k_{\text{пер}}=1,6 \dots 2$, а для легких условий пуска принимать $k_{\text{пер}}=2,5$. В случае применения предохранителя с плавкой вставкой из легкоплавкого материала можно увеличить коэффициент $k_{\text{пер}}$. При этом для тяжелых условий пуска рекомендуется принимать $k_{\text{пер}}=3,75$, а для легких условий пуска — режим кратковременной перегрузки не учитывать.

Если в защищаемой предохранителями сети установлены магнитные пускатели или контакторы, то для исключения их отпускания из-за снижения напряжения при коротких замыканиях плав-

ный характер без значительного увеличения тока при ее включении (освещение, асинхронные двигатели с фазным ротором). Бывают и такие нагрузки, характер которых вызывает кратковременные перегрузки элементов, защищаемых плавкими предохранителями. Кратковременные перегрузки могут возникать в результате пуска или самозапуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, технологических перегрузок механизмов и по другим причинам, при этом предохранитель перегорать не должен. Однако благодаря кратковременному характеру перегрузки (5—10 с) представляется возможным номинальный ток плавкой вставки $I_{\text{вс.ном}}$ выбирать меньшим тока перегрузки $I_{\text{пер}}$.

Если в защищаемой предохранителями сети установлены магнитные пускатели или контакторы, то для исключения их отпускания из-за снижения напряжения при коротких замыканиях плав-

кая вставка предохранителя должна перегореть за время $t_{пр} = 0,1 \dots 0,2$ с при повреждении в наиболее удаленной точке сети (для предохранителя $F1$ точка K_1 на рис. 11.1, а). Из анализа защитных характеристик предохранителей следует, что это условие обеспечивается при кратности тока короткого замыкания $I_k/I_{нс.ном} = 10 \dots 15$.

Таким образом, при выборе предохранителя $F1$ для защиты линии L (рис. 11.1, а) сети напряжением U_c следует учитывать условия

$$U_{пр.ном} = U_c \text{ и } I_{пр.отк} \geq I_{к \max}, \quad (11.1)$$

а его плавкую вставку выбирать с учетом следующего:

$$\left. \begin{aligned} I_{нс.ном} &\geq k_{отс} I_{раб \max} \text{ (первое условие),} \\ I_{нс.ном} &\geq I_{пер}/k_{пер} \text{ (второе условие),} \\ I_{нс.ном} &\leq I_{к \min}/(10 \dots 15) \text{ (третье условие),} \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

где $I_{раб. \max}$ — максимальный рабочий ток, проходящий через предохранитель; $k_{отс} = 1,1 \dots 1,25$ — коэффициент отстройки.

Ток кратковременной перегрузки $I_{пер}$ принимается большим из двух значений, рассчитанных: для случая пуска наиболее мощного электродвигателя и режима нормальной работы всех остальных потребителей, подключенных к защищаемой линии, — по формуле

$$I_{пер} = k_c \sum_1^{n-1} I_{раб \max} + I_{пск \max};$$

для режима самозапуска оставшихся в работе электродвигателей, возникающего после отключения поврежденного потребителя, например после отключения электродвигателя $M1$ предохранителем $F2$ (к. з. в точке K_2),

$$I_{пер} = \sum_1^m I_{пск},$$

где $\sum_1^{n-1} I_{раб \max}$ — сумма максимальных рабочих токов всех потребителей, присоединенных к защищаемой линии без учета электродвигателя с наибольшим пусковым током $I_{пск \max}$; $\sum_1^m I_{пск}$ —

сумма пусковых токов самозапускающихся электродвигателей; n — число потребителей; m — число самозапускающихся электродвигателей; k_c — коэффициент спроса, $k_c < 1$.

В зависимости от характера нагрузки и необходимости самозапуска номинальный ток плавкой вставки выбирают по первому

или второму условию (11.2), принимают ближайшим по шкале стандартных токов и проверяют по третьему условию при наличии в защищаемой сети магнитных пускателей или контакторов. Выбранные предохранители должны удовлетворять требованиям чувствительности и по возможности действовать селективно.

§ 11.3. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СЕЛЕКТИВНОСТЬ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Чувствительность. К предохранителям, как и к другим устройствам защиты, предъявляются следующие требования чувствительности [3]:

1. Номинальный ток плавкой вставки должен быть по крайней мере в три раза меньше минимального тока к.з. в конце защищаемого участка $I_{к\ min}$ (для предохранителя $F1$ точка K_1 на рис. 11.1, a); в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью расчетным при определении $I_{к\ min}$ является замыкание между фазным и нулевым проводами. Ток к.з.

$$I_{к\ min}^{(1)} \approx U_{\phi} / (|Z_{\pi} + Z_{\tau} / 3|), \quad (11.3)$$

где U_{ϕ} — фазное напряжение сети, В; Z_{τ} — полное электрическое сопротивление трансформатора, питающего сеть, Ом; $Z_{\pi} = \sqrt{r_{\pi}^2 + x_{\pi}^2}$ — полное сопротивление петли фазной — нулевой провода линии, Ом.

Для более точных расчетов необходимо учитывать сопротивления системы x_c и r_c и сопротивление дуги R_d , принимаемое обычно равным 15 мОм. В этом случае в выражении (11.3) вместо

$$Z_{\tau} = \sqrt{(x_{1\tau} + x_{2\tau} + x_{0\tau})^2 + (r_{1\tau} + r_{2\tau} + r_{0\tau})^2}$$

следует использовать [83]

$$Z_{\tau} = \sqrt{(x_{1\tau} + x_{2\tau} + x_{0\tau} + 2x_c)^2 + (r_{1\tau} + r_{2\tau} + r_{0\tau} + 2r_c + 3R_d)^2}.$$

2. Если предохранитель защищает сеть только от коротких замыканий, то требования, изложенные в п. 1, не обязательны при условии, что номинальный ток плавкой вставки не превышает длительно допустимого тока $I_{дл. доп}$ для защищаемого участка сети более чем в три раза;

3. Для сетей, защищаемых от перегрузки кроме требований, изложенных в п. 1, должно выполняться условие $I_{дл. доп} \geq k' I_{вс. ном}$; коэффициент k' определяется типом изоляции проводников и условиями их эксплуатации. Для проводников с резиновой и аналогичной по тепловым характеристикам изоляцией, проложенных во взрывоопасных производственных помещениях, $k' = 1,25$, в помещениях невзрывоопасных $k' = 1$; для кабелей с бумажной изоляцией во всех случаях $k' = 1$.

Для выполнения требований, изложенных в п. 3, часто увеличивают сечение проводника, увеличивая тем самым его длительно допустимый ток. В некоторых случаях завышение сечений и дополнительный расход металла могут оказаться столь значительными, что экономически целесообразным станет применение автоматических выключателей, более дорогих и более сложных, чем предохранители, но имеющих более благоприятную (для защиты от перегрузок) защитную характеристику. Для этого возможно использование и управляемых предохранителей.

Таким образом, при использовании предохранителей необходимо стремиться к обоснованному уменьшению номинального тока плавкой вставки. При этом следует иметь в виду, что ток $I_{вс.ном}$, выбранный по второму условию (11.2), очевидно, имеет завышенное значение. Практически ток кратковременной перегрузки $I_{пер}$ оказывается меньше расчетного, так как пуск и самозапуск электродвигателя происходят при напряжениях менее номинальных, а самозапуск, кроме того, может начинаться при некотором числе оборотов. Поэтому в каждом конкретном случае следует определять ток $I_{пер}$ с учетом снижения напряжения и режима самозапуска. Необходимо также уточнить значения коэффициента $k_{пер}$. Как следует, например, из рис. 4.3 (см. § 4.2), для предохранителя ПН-2 при легких условиях пуска ($t \approx 5$ с) он в зависимости от номинального тока плавкой вставки может быть принят $k_{пер} = 3,5 \dots 5$, а при тяжелых условиях пуска ($t \approx 10$ с) — соответственно $k_{пер} = 3 \dots 4$. Поэтому целесообразно пользоваться не усредненными значениями $k_{пер}$, а защитными характеристиками конкретных предохранителей.

Селективность. Если в сети установлено несколько последовательно включенных предохранителей, то при коротком замыкании в какой-либо точке сети перегорает ближайший к точке короткого замыкания предохранитель. На рис. 11.1, а последовательно с предохранителем $F1$ включены предохранители $F2—F6$. Очевидно, селективная работа предохранителей обеспечивается при любых токах к. з., если при коротком замыкании, например, в точке K_2 плавкая вставка предохранителя $F2$, перегорая, разорвет дугу раньше, чем плавкая вставка предохранителя $F1$ успеет нагреться до температуры плавления. Это возможно только в том случае, если защитная характеристика 1 плавкой вставки предохранителя $F1$ располагается выше защитной характеристики 2 плавкой вставки предохранителя $F2$ во всем диапазоне токов, проходящих по защищаемой цепи при перегрузках и при коротких замыканиях (рис. 11.1, б). Если номинальный ток плавкой вставки предохранителя $F2$ больше номинального тока плавкой вставки любого другого предохранителя $F3—F6$, то селективность сохраняется и при к.з. в цепях других электродвигателей. Поэтому если к питающей линии подключено несколько электроприемников, то достаточно согласовать между собой защитную характеристику плав-

кой вставки предохранителя питающей линии с защитной характеристикой плавкой вставки наиболее мощного электроприемника.

Из сопоставления защитных характеристик видно, что отличие во времени перегорания плавких вставок уменьшается с увеличением тока. Кроме того, необходимо иметь в виду, что длительность перегорания вставки при малых кратностях $k = I_{вс} / I_{вс.ном} = 1,4 \dots 3,5$, т. е. при токах перегрузки, изменяется в широких пределах. Поэтому, поскольку при таких токах защитная характеристика предохранителя имеет большой разброс, ее можно изображать не в виде кривой, а в виде некоторой зоны, ограниченной двумя кривыми. Разброс характеристики обусловлен тем, что при токах перегрузки на время перегорания плавкой вставки существенное влияние оказывают условия отвода теплоты через контакты в окружающую среду.

При коротком замыкании, когда через предохранители проходят большие токи (кратностью $k > 3,5$), процесс перегорания плавкой вставки происходит очень быстро (сотые доли секунды), поэтому условия отвода теплоты почти не оказывают влияния на длительность перегорания. Необходимо также иметь в виду разную степень предварительного нагрева последовательно установленных предохранителей. Поэтому для получения селективного действия большинства типов предохранителей рекомендуется руководствоваться следующими правилами: для последовательно установленных однотипных низковольтных предохранителей необходимо выбирать плавкие вставки с номинальными токами, отличающимися на две ступени шкалы; для разнотипных предохранителей из-за больших погрешностей желательно выбирать плавкие вставки с номинальными токами, отличающимися больше чем на две ступени шкалы, сохраняя требуемую чувствительность; для последовательно установленных высоковольтных предохранителей ПКТ необходимо выбирать плавкие вставки с номинальными токами, отличающимися на одну ступень шкалы; во всех случаях должны выполняться условия (11.2).

Однако такое согласование характеристик низковольтных предохранителей не всегда обеспечивает их селективную работу при указанных больших токах к.з. На основании длительной эксплуатации установлено, что фактическое время отключения предохранителя может отличаться от полученного по его защитной характеристике на $\Delta t_{пр} = \pm 0,5t_{пр}$. При этом селективность при больших кратностях тока обеспечивается, если $1,5t_{пр 2} \leq 0,5t_{пр 1}$ или $t_{пр 1} \geq 3t_{пр 2}$.

Таким образом, для получения селективного действия последовательно включенных предохранителей необходимо, чтобы при максимальном токе к.з. время отключения, определенное по защитной характеристике предохранителя $F1$, более удаленного от места повреждения, было не менее чем в три раза больше времени отключения предохранителя $F2$, расположенного вблизи точки

короткого замыкания (рис. 11.1, а). Для разнотипных предохранителей селективность должна проверяться для всех токов цепи в нормальном режиме и при коротких замыканиях. Селективное действие низковольтных предохранителей можно обеспечить также при соответствующем выборе сечений плавких вставок с учетом материала их изготовления и конструкции предохранителя [56].

Однако это практически удастся только при больших кратностях тока. Кроме того, такой выбор предохранителей не позволяет согласовать их работу с другими защитными аппаратами. Поэтому в технических данных указывают не сечение плавких вставок, а их номинальные токи и защитные характеристики. Более приемлем способ согласования защитных характеристик по условию $t_{\text{пр}1} \geq 3t_{\text{пр}2}$. Однако он громоздок и допускает определенные погрешности, появляющиеся при пользовании характеристиками. Они обусловлены рядом причин, главные из которых — неудобство пользования логарифмической шкалой ординаты $t_{\text{пр}}$ и снижение точности определения зоны возможного разброса времени перегорания предохранителя, а также мелкомасштабность шкалы кратности тока $k = I_{\text{вс}}/I_{\text{вс.ном}}$, в результате чего неизбежны погрешности при определении k .

В связи с указанным желательны защитными характеристиками не пользоваться, а согласовывать работу последовательно установленных предохранителей по номинальным токам плавких вставок. Для этого необходимо получить аналитическую связь между номинальными токами плавких вставок, при которой обеспечивается селективная работа предохранителей. Эту связь можно установить на основе аналитического выражения защитной характеристики $t_{\text{пр}} = f(k)$. Метод получения этой зависимости изложен в [82]. Для предохранителя ПН-2, например, аналитическое выражение защитной характеристики в интервале от $0,05 < t_{\text{пр}} < 10$ с имеет вид

$$t_{\text{пр}} = 2500/k^{4,8}. \quad (11.4)$$

Селективное действие предохранителей $F1$ и $F2$ (рис. 11.1, а) обеспечивается, если $t_{\text{пр}1} \geq 3t_{\text{пр}2}$ или

$$1/(I_{\text{вс}}/I_{\text{вс.ном}1})^{4,8} \geq 3/(I_{\text{вс}}/I_{\text{вс.ном}2})^{4,8}.$$

Отсюда

$$I_{\text{вс.ном}1} \geq 1,26 I_{\text{вс.ном}2}. \quad (11.5)$$

Если принять погрешность предохранителей $\Delta t_{\text{пр}} = \pm 25\%$, то селективность обеспечивается в заданном интервале $t_{\text{пр}}$ при условии

$$I_{\text{вс.ном}1} \geq 1,12 I_{\text{вс.ном}2}. \quad (11.6)$$

Аналогичные зависимости можно получить и при согласовании характеристик предохранителей разных типов.

§ 11.4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВОЗДУШНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ИХ УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ (РАСЦЕПИТЕЛИ)

Автоматические выключатели выпускаются в одно-, двух- и трехполюсном исполнении постоянного и переменного тока. Их снабжают специальными устройствами токовой релейной защиты, которые в зависимости от типа выключателя выполняют в виде токовой отсечки, максимальной токовой защиты с зависимой и независимой выдержкой времени или в виде двухступенчатой и трехступенчатой токовой защиты. Для этого используют рассмотренные выше электромагнитные, тепловые и полупроводниковые реле. Устройства защиты автоматических выключателей называют *расцепителями*.

Основными характеристиками автоматических выключателей являются номинальный ток $I_{a,ном}$, номинальное напряжение $U_{a,ном}$ и номинальный ток отключения $I_{a,откл}$.

Номинальным током автоматического выключателя называется наибольший ток, при котором выключатель может работать в течение неограниченно длительного времени. *Номинальное напряжение выключателя* равно напряжению сети, для работы в которой он предназначен. *Номинальным током отключения* называется наибольший ток, который выключатель способен отключить. Расцепитель характеризуется номинальным током $I_{рц,ном}$ и, как любое устройство токовой защиты, током срабатывания $I_{с,з}$ и выдержкой времени $t_{с,з}$ каждой ступени. *Номинальным током расцепителя* называется наибольший ток, длительное прохождение которого не вызывает срабатывания расцепителя.

Рассмотрим характеристики расцепителей автоматических выключателей.

Расцепители автоматических выключателей АЗ100. Эти автоматические выключатели в свое время были основной и наиболее массовой серией применяемых выключателей. С помощью тепловых расцепителей (см. § 4.2) выполнена максимальная токовая защита. Расцепитель откалиброван на заводе и его уставку тока срабатывания нельзя изменять в условиях эксплуатации. Выключатель АЗ160 снабжается только тепловым расцепителем. Сочетание теплового расцепителя с электромагнитным расцепителем мгновенного действия позволяет выполнить двухступенчатую токовую защиту, содержащую первую и третью ступени. При перегрузках защита действует с зависимой выдержкой времени, а при коротких замыканиях — без выдержки времени. Такое устройство защиты можно назвать *комбинированным расцепителем*. В условиях эксплуатации его параметры тоже нельзя изменять. Защитные (время-токовые) характеристики комбинированных расцепителей автоматических выключателей АЗ110 даны на рис. 11.2.

Расцепители автоматических выключателей АЗ700. Различают селективные (С) и токоограничивающие быстродействующие (Б) автоматические выключатели АЗ700. Селективные выключатели снабжаются полупроводниковым, настраиваемым в условиях эксплуатации расцепителем серии РП, обеспечивающим двухступенчатую токовую защиту. Расцепитель селективного автоматического выключателя АЗ790С содержит все три ступени токовой защиты. При токах более 20 кА он отключается без выдержек времени. Защитные характеристики полупроводникового расцепителя выключателя АЗ700 показаны на рис. 11.3. Устройство защиты допускает регулировку номинального тока расцепителя $I_{рц,ном}$. При этом вместе с $I_{рц,ном}$ изменяется и ток срабатывания $I_{с,з}$ максимальной

токовой защиты (третья ступень), так что при любом $I_{рц.ном}$ выполняется условие $I^{III}_{с.з} = 1,25 I_{рц.ном}$. Непосредственно ток $I^{III}_{с.з}$ в условиях эксплуатации не регулируется.

Коэффициент возврата реле составляет 0,97—0,98. В отличие от максимальной токовой защиты у токовой отсечки с выдержкой времени (вторая ступень) имеется возможность устанавливать несколько значений тока срабатывания $I^{II}_{с.з}$, связанных с $I_{рц.ном}$ условием $I^{II}_{с.з} = k I_{рц.ном}$, где коэффициент кратности $k = 2, 3, 5, 7, 10$.

Устройство позволяет изменять наклон характеристики выдержек времени максимальной токовой защиты так, что при токе $6 I_{рц.ном}$ можно получить вы-

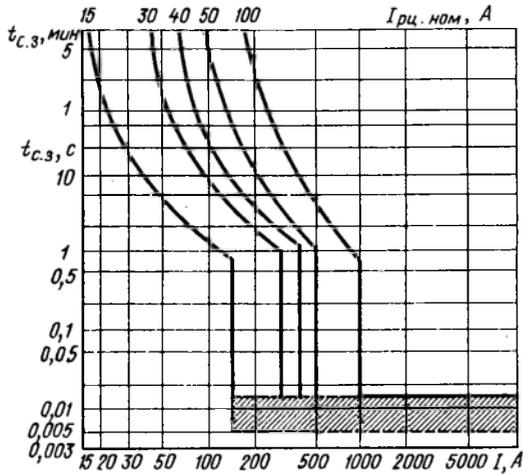


Рис. 11.2. Защитные характеристики комбинированных расцепителей автоматических выключателей АЗ110

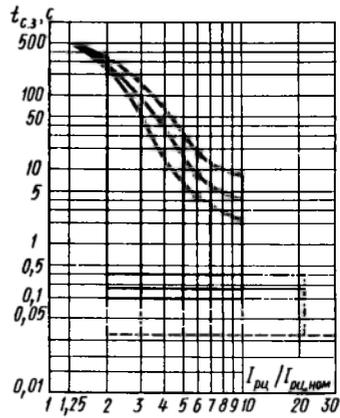


Рис. 11.3. Защитные характеристики расцепителя РП автоматического выключателя АЗ700

держки времени, равные 4, 8 и 16 с. Токовая отсечка имеет независимую регулируемую выдержку времени. Можно установить время срабатывания 0,1, 0,25 и 0,4 с.

Все токоограничивающие автоматические выключатели снабжены токовой отсечкой без выдержки времени. Если она выполняется электромагнитными расцепителями, то может быть дополнена тепловым расцепителем. Ни электромагнитный, ни тепловой расцепитель в условиях эксплуатации не регулируются. Быстродействующие выключатели снабжаются также полупроводниковым расцепителем.

Его характеристики отличаются от рассмотренных выше (см. рис. 11.3) тем, что токовая отсечка выполняется без выдержки времени. Токоограничивающее устройство под действием электродинамических сил размыкает контакты выключателя при прохождении через них значительных токов к.з. независимо от действия токовой отсечки, причем отключение происходит раньше, чем ток к.з. успеет достичь максимального значения.

Расцепители автоматического выключателя «Электрон». Этот выключатель снабжен регулируемым полупроводниковым расцепителем РМТ. Расцепитель позволяет выполнить трехступенчатую токовую защиту с зависимой и независимой выдержкой времени третьей ступени. Характеристики устройства защиты показаны на рис. 11.4. Из сопоставления этих характеристик с характеристиками

расцепителя серии РП (см. рис. 11.3) следует, что для третьих ступеней защиты с зависимой выдержкой времени характеристики одинаковы. Пределы и способы регулирования тока срабатывания $I_{с.з}^{III}$ и выдержки времени $t_{с.з}^{III}$ идентичны. Коэффициент возврата реле составляет $k_r=0,75$. Расцепитель РМТ позволяет выполнить третью ступень с независимой выдержкой времени (характеристика, обозначенная на рис. 11.4 штрихпунктирной линией). Для токовой отсечки у расцепителя РМТ несколько ограниченный диапазон уставок тока срабатывания. Здесь коэффициент кратности $k=3; 5; 7; 10$. Расцепитель позволяет выполнить ее с выдержкой времени и без выдержки времени. В трехступенчатой защите выдержка времени второй ступени может быть установлена $t_{с.з}^{II}=0,25; 0,45; 0,7$ с. Ток срабатывания первой ступени не регулируется. Расцепитель срабатывает без выдержки времени при токе $I_{с.з}^{I}=(2,2 \dots 3)I_{с.з}^{II}$.

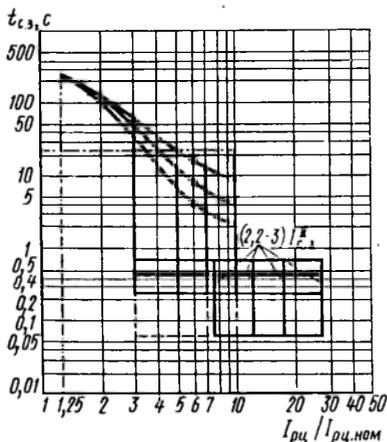


Рис. 11.4. Защитные характеристики расцепителя РМТ автоматического выключателя серии «Электрон»

Расцепители автоматического выключателя ВА. Для выполнения устройства защиты выключателя серии ВА используют электротепловые, электромагнитные и полупроводниковые расцепители. В зависимости от номинального тока и назначения выключателя применяют различные комбинации из этих расцепителей. Так, например, у селективных автоматических выключателей ВА55 и ВА75 трехступенчатая защита выполнена полупроводниковым расцепителем БПР. Его время-токовые характеристики показаны на рис. 11.5, а. Расцепитель БПР, как и расцепители РП и РМТ, допускает дискретную регулировку номинального тока расцепителя $I_{рц.ном}$. При этом регулируется и ток срабатывания третьей ступени защиты $I_{с.з}$, но сохраняется условие $I_{с.з}^{III}=1,25I_{рц.ном}$. Коэффициент возврата реле составляет $k_r=0,97 \dots 0,98$. Защита имеет три характеристики вы-

держек времени, устанавливаемые при токе $I_{рц}=6I_{рц.ном}$ (4, 8, 16 с). Диапазон уставок срабатывания отсечки различен. У одних расцепителей коэффициент кратности $k=2; 3; 5$ у других — $k=2; 3; 5; 7; 10$. Выдержка времени второй ступени защиты может быть установлена равной 0,1; 0,2; 0,3 с. У неселективных выключателей отсечка действует без выдержки времени (на рис. 11.5, а характеристика показана штрихпунктирной линией). Ток срабатывания первой ступени защиты $I_{с.з}^I$ в условиях эксплуатации не регулируется. Он зависит от номинального тока выключателя. Расцепитель БПР может быть выполнен без третьей ступени, а также с защитой нулевой последовательности от однофазных к. з. Ток срабатывания защиты от однофазных к. з. в условиях эксплуатации не регулируется. Он устанавливается на заводе так, что защита срабатывает при условии $0,5I_{рц.ном} \leq I_{с.з} \leq I_{рц.ном}$. Защита имеет регулируемую ограниченно зависимую характеристику выдержки времени (рис. 11.5, б характеристики 1, 2, 3), устанавливаемую вместе с выдержкой времени второй ступени защиты от междуфазных к. з. На неселективных автоматических выключателях защита выполнена без выдержки времени. Ее время срабатывания определяется характеристикой 4 (рис. 11.5, б). На неселективных выключателях ВА51 и ВА52 защита выполняется электромагнитными и тепловыми расцепителями или только электромагнитными расцепителями. Характеристика комбинированного расцепителя показана на рис. 11.5, в. Электромагнитные расцепители осуществляют первую ступень защиты, а тепловые — третью.

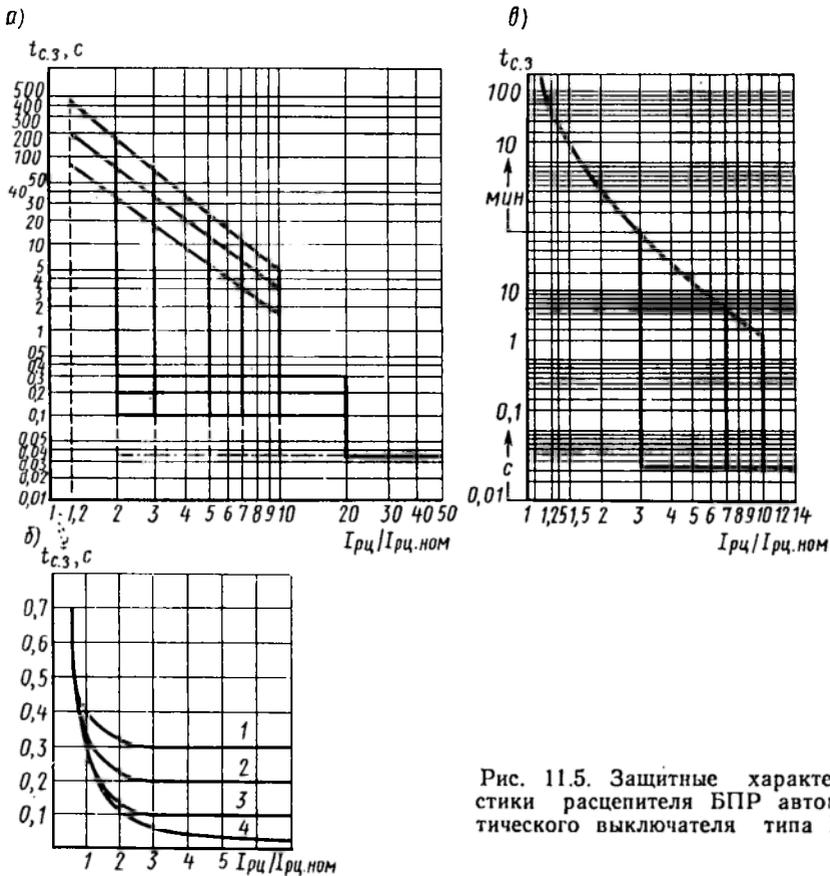


Рис. 11.5. Защитные характеристики расцепителя БПР автоматического выключателя типа ВА

§ 11.5. ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Основные принципы выбора параметров токовой защиты рассмотрены ранее (см. § 5.3—5.5). Они сохраняются и при выполнении защиты расцепителями автоматических выключателей. Однако реализация этих принципов в связи со специфическими особенностями расцепителей имеет некоторое своеобразие и встречает определенные трудности. Общим для всех автоматических выключателей является соблюдение следующих требований:

номинальное напряжение $U_{а.ном}$ должно быть не ниже напряжения сети, а отключающая способность — достаточно большой, чтобы автоматический выключатель мог отключить максимальные токи к.з., проходящие по защищаемой линии;

номинальный ток расцепителя $I_{рц.ном}$ выбирается не меньшим максимального рабочего тока $I_{раб\ max}$, длительно проходящего по защищаемой линии с учетом возможной ее перегрузки; если $I_{раб\ max}$ не совпадает со стандартной шкалой номинальных токов расцепителя, то принимается ближайшее большее значение; таким образом, должно выполняться условие

$$I_{рц.ном} \geq I_{раб\ max} \quad (11.7)$$

Первая ступень защиты — токовая отсечка без выдержки времени. Для обеспечения селективного действия первой ступени защиты автоматического выключателя $SF1$ (рис. 11.6), как и для любой токовой отсечки, необходимо ее ток срабатывания $I_{с.з.1}^I$ отстроить от максимального тока внешнего короткого замыкания $I_{к.вн\ max}^{(3)}$ (точка K_1 на рис. 11.6), т. е. должно выполняться условие (5.2), согласно которому $I_{с.з.1}^I = k_{отс}^I I_{к.вн\ max}^{(3)}$. Однако выполнить это условие часто бывает невозможно, так как у селективных автоматических выключателей, снабженных трехступенчатой токовой защитой, уставка тока срабатывания первой ступени не регулируется. Так, для выключателя АЗ790С ток $I_{с.з.1}^I = 20$ кА, для выключателей ВА55 и ВА75 он зависит от их номинального тока и составляет 20—45 кА, а для выключателей «Электрон» ток $I_{с.з.1}^I$ связан с током срабатывания $I_{с.з.2}^{II}$ второй ступени, $I_{с.з.1}^I = (2,2 \dots 3) I_{с.з.2}^{II}$. Поэтому расчет параметров токовой отсечки сводится к сопоставлению значения тока $I_{к.вн\ max}^{(3)}$ с указанными значениями тока $I_{с.з.1}^I$. Если неселективные действия не допускаются, но оказалось, что $I_{к.вн\ max}^{(3)} > I_{с.з.1}^I$, то необходимо либо принять другой выключатель, либо использовать не расцепитель, а отдельную токовую защиту.

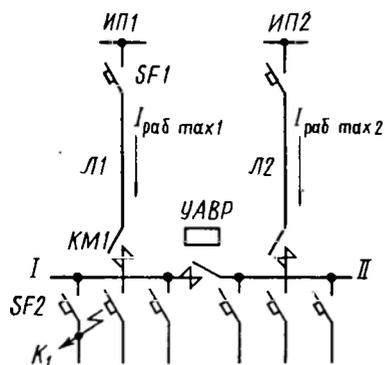


Рис. 11.6. Защита сети расцепителями автоматических выключателей

Вторая ступень защиты — токовая отсечка с выдержкой времени. При выборе параметров второй ступени защиты необходимо обеспечить селективность при внешних к.з. и исключить ее срабатывание при кратковременных перегрузках. Селективное действие при внешних к.з. достигается при выполнении условий, обобщенных в § 5.4.

Требуется ток срабатывания $I_{с.з.2}^{II}$ и выдержку времени $t_{с.з.2}^{II}$ второй ступени защиты выключателя $SF1$ отстроить от тока срабатывания $I_{с.з.2}^I$ и выдержки времени $t_{с.з.2}^I$ первой ступени защиты выключателя $SF2$, т. е. выполнить условия

$$\left. \begin{aligned} I_{с.31}^{II} &\geq k_{отс}^{II} I_{с.32}^I, \\ t_{с.31}^{II} &= t_{с.32}^I + \Delta t, \end{aligned} \right\} \quad (11.8)$$

где $k_{отс}^{II} = 1,3 \dots 1,5$; Δt — ступень селективности: для выключателей ВА55, ВА75 $\Delta t = 0,1$ с; для выключателя АЗ790С $\Delta t = 0,15$ с и для выключателя «Электрон» $\Delta t = 0,2 \dots 0,25$ с. Для исключения срабатывания при кратковременных перегрузках необходимо выполнить условие

$$I_{с.31}^{II} \geq k_{отс}^{II} I_{пер}, \quad (11.9)$$

где $k_{отс}^{II}$ принимается для выключателей АЗ790, ВА равным 1,5, а для выключателя «Электрон» — 1,6. Ток кратковременной перегрузки $I_{пер}$ определяется, как и при выборе плавких предохранителей (см. § 11.2). При наличии УАВР (рис. 11.6) необходимо также учесть режим кратковременной перегрузки после АБР, когда электропотребители секции II подключаются к линии Л1. При этом

$$I_{пер} = k'' I_{раб \max 1} + k_{сзп} I_{раб \max 2},$$

где k'' — коэффициент, учитывающий некоторое увеличение тока электродвигателей секции I при снижении напряжения на секции вследствие подключения к ней самозапускающихся электродвигателей секции II; в зависимости от доли двигательной нагрузки секции I рекомендуется принимать $k'' = 1 \dots 1,5$ [83]; $k_{сзп}$ — коэффициент самозапуска электродвигателей секции II, подключаемых к линии Л1 определяется расчетом. Ток срабатывания $I_{с.31}^{II}$ принимается большим из двух значений, полученных по условиям (11.8), (11.9).

Третья ступень защиты — максимальная токовая защита. Выбор параметров третьей ступени защиты обоснован в § 5.5. Для расцепителей автоматических выключателей ступенчатый выбор выдержек времени дополняется требованием несрабатывания защиты при кратковременных перегрузках, т. е. должно выполняться условие $t_{с.3}^{III} > t_{пер}$, поэтому в выражении (5.7) коэффициент самозапуска $k_{сзп}$ принимается равным единице, т. е.

$$I_{с.3}^{III} = (k_{отс}^{III}/k_n) I_{раб \max}. \quad (11.10)$$

У расцепителей уставка тока срабатывания третьей ступени $I_{с.3}^{III}$ не настраивается. Она связана с номинальным током расцепителя. Так, для полупроводниковых расцепителей $I_{с.3}^{III} = 1,25 I_{р.н.ом}$. Поэтому задача сводится к правильному выбору номинального тока расцепителя. С учетом (11.10)

$$I_{р.н.ом} \geq [k_{отс}^{III}/(1,25k_n)] I_{раб \max}. \quad (11.11)$$

Коэффициент отстройки $k_{отс}^{III}$ определяется погрешностью расцепителя. Его значения даны в [83]. Используя эти данные и со-

ответствующие значения коэффициента возврата $k_{в}$, указанные в § 11.4, получим:

для расцепителей выключателя «Электрон» $I_{рц.ном} = 1,6I_{раб\ max}$;

для расцепителей выключателей АЗ700 и ВА $I_{рц.ном} = 1,1I_{раб\ max}$.

Для тепловых расцепителей достаточным является условие (11.7). Из анализа защитных характеристик расцепителей (см. § 11.4) следует, что при таком выборе номинального тока расцепителя и четырехкратной перегрузке ($I_{пер} = 4I_{раб\ max}$) полупроводниковый расцепитель выключателя АЗ700 в зависимости от выбранной характеристики сможет отключить выключатель только через $t_{III\ c.з} = 15 \dots 60$ с (см. рис. 11.3), полупроводниковый расцепитель выключателя ВА — через $t_{III\ c.з} = 10 \dots 40$ с (см. рис. 11.5, а), а расцепитель выключателя «Электрон» — через $t_{III\ c.з} = 100 \dots 120$ с (см. рис. 11.4). Тепловые расцепители также обеспечивают отстройку от кратковременных перегрузок. При четырехкратной перегрузке расцепитель выключателя АЗ100 сможет отключить выключатель через $t_{III\ c.з} = 10$ с (см. рис. 11.2), а расцепитель выключателя ВА — через $t_{III\ c.з} = 25$ с (см. рис. 11.5, в). Расчеты показывают [84], что в сетях напряжением до 1 кВ кратковременная перегрузка и продолжительность ее меньше значений, указанные выше.

Защита нулевой последовательности от коротких замыканий на землю. Эту защиту может содержать только расцепитель выключателя типа ВА. Определение тока срабатывания защиты не имеет смысла, так как расцепитель не позволяет его настроить. Он устанавливается, как отмечалось выше (см. § 11.4), заводом-изготовителем и составляет $(0,5 \dots 1)I_{рц.ном}$. Выдержка времени регулируется, но устройством токовой отсечки. Все это затрудняет применение этой защиты в конкретных условиях: отстроить ее от несимметричной нагрузки, согласовать с другими защитами от коротких замыканий на землю. Поэтому она требует дальнейшего совершенствования.

§ 11.6. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И СЕЛЕКТИВНОСТЬ РАСЦЕПИТЕЛЕЙ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

Расцепители автоматических выключателей должны удовлетворять требованиям чувствительности и по возможности действовать селективно.

Чувствительность. В сетях, защищаемых только от токов к. з., расцепители автоматических выключателей с выбранными уставками тока срабатывания должны удовлетворять требованиям чувствительности, которые сводятся к следующему [3]: минимальный ток короткого замыкания $I_{к\ min}$ в наиболее удаленной точке защищаемой линии должен быть больше номинального тока расцепителя $I_{рц.ном}$ не менее чем в три раза; для автоматических выключателей, имеющих только расцепители мгновенного срабатывания, должны выполняться соотношения $I_{к\ min} \geq 1,4I_{c.з}^I$ для вы-

ключателей с $I_{a,ном} < 100$ А и $I_{к min} \geq 1,25 I'_{с.з}$ для всех других выключателей. В сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью для определения тока $I_{к min}$ используется выражение (11.3).

Допускается не проверять чувствительность защиты по кратности тока короткого замыкания в случаях, если: ток уставки мгновенного срабатывания (выключатель имеет только мгновенно действующий расцепитель) $I'_{с.з} \leq 4,5 I_{дл.доп}$, где $I_{дл.доп}$ — длительно допустимый ток защищаемой линии; ток уставки настраиваемого расцепителя замедленного срабатывания $I''_{с.з} \leq 1,25 I_{дл.доп}$ (при наличии мгновенного действующего расцепителя его кратности тока срабатывания не ограничиваются); номинальный ток ненастраиваемого расцепителя замедленного срабатывания $I_{рц.ном} \leq I_{дл.доп}$ (независимо от наличия или отсутствия мгновенно действующего расцепителя).

Для сетей, защищаемых и от перегрузки, должны выполняться следующие условия: $I'_{с.з} \leq (0,8 \dots 1) I_{дл.доп}$ для выключателей, имеющих только мгновенно действующий расцепитель в зависимости от типа изоляции проводников; $I_{рц.ном} \leq I_{дл.доп}$ для ненастраиваемого расцепителя и проводников всех марок; $I''_{с.з} \leq (1 \dots 1,25) I_{дл.доп}$ для ненастраиваемого расцепителя в зависимости от типа изоляции проводников.

Селективность. Для обеспечения селективного отключения последовательно установленных автоматических выключателей защитные характеристики их расцепителей не должны пересекаться, причем уставки тока у расцепителя выключателя *SF1*, расположенного ближе к источнику питания, должны быть больше, чем у расцепителя автоматического выключателя *SF2*, более удаленного от источника питания сети (рис. 11.6). В том случае, если характеристика расцепителя первого выключателя, выбранная по условиям изложенным в § 11.5, не удовлетворяет требованиям селективности, его уставки принимаются выше расчетных. Но и при этом не всегда удается получить селективно действующую защиту во всем диапазоне токов короткого замыкания. Для неселективных автоматических выключателей это может быть, если максимальный ток внешнего короткого замыкания $I^{(3)}_{к.вн max}$ оказывается выше наибольшего тока настраиваемой уставки отсечки. У селективных выключателей, имеющих трехступенчатую защиту, ток срабатывания первой ступени $I'_{с.з}$, как уже отмечалось, строго фиксирован. Селективного действия добиться нельзя, если $I'_{с.з} \leq I^{(3)}_{к.вн max}$.

При согласовании защитных характеристик среднюю погрешность действия расцепителей принимают равной $\Delta t_{с.з} = \pm 20\%$ независимо от типа выключателя [84]. В этом случае для любого значения тока перегрузки и тока короткого замыкания селективность обеспечивается, если $0,8 t_{с.з 1} \geq 1,2 t_{с.з 2}$ или $t_{с.з 1} \geq 1,5 t_{с.з 2}$.

В сетях напряжением до 1 кВ необходима селективность при совместной работе автоматических выключателей и плавких предохранителей. При этом ближе к источнику питания может находиться как выключатель, так и предохранитель. В первом случае селективного действия всегда можно достичь используя селективный автоматический выключатель. Селективность обеспечивается и при неселективном выключателе, если ток наибольшей уставки отсечки выше, чем ток к.з. при повреждении за предохранителем. Во втором случае, когда ближе к источнику находится предохранитель, требования к селективности такие же, как и при согласовании между собой защитных характеристик предохранителей.

Следует отметить, что условие $t_{\text{пр}1} \geq 3t_{\text{пр}2}$ получены для максимальных погрешностей в работе предохранителей $\Delta t_{\text{пр}} \geq 0,5t_{\text{пр}}$. Однако для обеспечения селективности считается достаточным исходить из средней погрешности $\Delta t_{\text{пр}} = \pm 0,25t_{\text{пр}}$. Это тем более допустимо при согласовании защитной характеристики предохранителя с защитной характеристикой более совершенного, чем предохранитель, расцепителя автоматического выключателя. При этом селективность обеспечивается, если $0,75t_{\text{пр}} \geq 1,25t_{\text{с.з}}$ или $t_{\text{пр}} \geq 1,7t_{\text{с.з}}$.

По сравнению с предохранителями автоматические выключатели имеют определенные преимущества: в нормальном режиме и при любых видах короткого замыкания они производят отключение всех трех фаз, тем самым исключаются неполнофазные режимы; они являются аппаратами многократного действия, что позволяет с их помощью выполнить схемы сетевой автоматики (УАПВ, УАВР); расцепители автоматических выключателей являются более совершенными защитными устройствами, чем плавкая вставка предохранителя. Однако автоматический выключатель значительно дороже предохранителя, что ограничивает область его применения.

§ 11.7. ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ С ГЛУХОЗАЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ И ПУТИ ЕЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ

Плавкие предохранители и расцепители автоматических выключателей, включаемые на полные фазные токи, отстраиваются от максимального рабочего тока защищаемой линии, который оказывается соизмеримым с током повреждения, проходящим через защиту при однофазных коротких замыканиях в конце протяженной (около 1 км) защищаемой линии.

Токи однофазного короткого замыкания меньше токов при повреждениях между фазами из-за значительного сопротивления петли фаза — нуль, а также из-за сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов, особенно с соединением обмоток Y/Y_0 . Поэтому чувствительность предохранителей и рас-

цепителей автоматических выключателей при однофазных коротких замыканиях часто оказывается недостаточной.

Для воздушной линии характерным повреждением является обрыв провода и падение его на землю. Это повреждение — основная причина поражения людей и животных, возникновения пожаров, особенно в сельской местности. Сопротивление растекания оборванных и касающихся земли проводов воздушных линий напря-

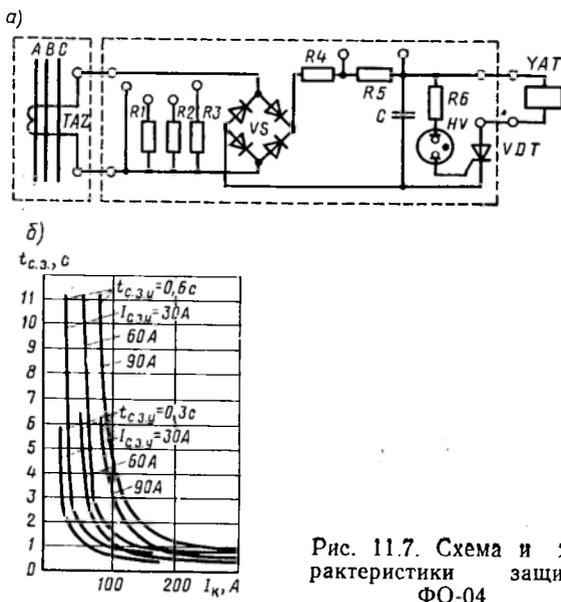


Рис. 11.7. Схема и характеристики защиты ФО-04

жением до 1 кВ изменяется в широких пределах, поэтому обеспечить защиту от однофазных коротких замыканий на землю в сельских сетях значительно сложнее, чем в сетях промышленных предприятий и городов.

Использование тока нулевой последовательности позволяет выполнить защиту более чувствительной, так как необходимость ее отстройки от максимального рабочего тока отпадает. Такая защита содержится только в расцепителе автоматического выключателя типа ВА. Но применить эту защиту в конкретных условиях часто оказывается невозможно из-за ее недостатков, отмеченных выше (см. § 11.4, 11.5), поэтому приходится использовать защиты нулевой последовательности, специально разработанные для сетей напряжением до 1 кВ. Одна из них — защита ФО-0,4 (рис. 11.7, а). Она содержит двухполупериодный выпрямитель VS, подключаемый к однофазному току через фильтр тока нулевой последовательности TAZ, элемент сравнения напряжения на конденсаторе C с постоянным напряжением, определяемым неоновой лампой HV,

и исполнительный тиристор *VDT*. При равенстве указанных напряжений неоновая лампа открывает триодный тиристор в цепи электромагнита отключения *YAT* (независимого расцепителя). Коммутационный аппарат отключается. Скорость нарастания напряжения на конденсаторе *C* определяется током повреждения, поэтому защита имеет зависимость от тока выдержку времени (рис. 11.7, б), определяемую сопротивлением резисторов *R4*, *R5*. Минимальные выдержки времени в независимой части уставки равны $t_{c.z.y}=0,3; 0,6$ с. С помощью резисторов *R1—R3* можно установить три значения (уставки) тока срабатывания; $I_{c.z.y}=30, 60, 90$ А. Резистор *R6* необходим для ограничения тока разряда неоновой лампы [85].

Недостатком защиты типа ФО-0,4 являются необходимость отстройки тока срабатывания от тока максимальной рабочей несимметрии, который может достигать половины максимального рабочего тока линии.

Согласно некоторым исследованиям, ток к.з. на землю в зависимости от состояния грунта может составлять всего несколько ампер. Минимальная же уставка по току защиты ФО-0,4 равна 30 А, т. е. защита может оказаться нечувствительной к коротким замыканиям на землю. Разработана защита, не требующая отстройки от токов несимметрии рабочего режима. Селективное действие защиты достигается путем сравнения фаз токов нулевой последовательности, проходящих в линии и в нейтрали трансформатора до точки присоединения нулевого провода. Однако для отстройки от токов небаланса ток срабатывания защиты приходится принимать 3—5 А, поэтому и эта защита в ряде случаев оказывается нечувствительной к коротким замыканиям на земле. Кроме того, она может ложно сработать, например, при обрыве нулевого провода и отказать при коротких замыканиях между фазным и нулевым проводами.

Более удачным решением, обеспечивающим селективность и требуемую чувствительность при однофазных коротких замыканиях на землю, является применение отдельных защитных нулевых проводов [86]. Но для этого требуется реконструкция существующих и строительство новых пятипроводных сетей. Безусловно, это потребует значительных капитальных затрат. Имеются и другие предложения. Но все они также основываются на предположении, что оборвавшийся провод имеет хороший контакт с землей, а заземляющие устройства нулевого провода значительно влияют на распределение тока нулевой последовательности. Часто это бывает не так, и ток к.з. на землю оказывается недостаточным для срабатывания защиты. В связи с этим имеются предложения искусственно увеличивать ток в защищаемой линии при обрыве провода и дальнейшем его падении на землю. Для этих целей используются короткозамыкатели, выполненные, например, на основе автоматических выключателей АП-50. Короткозамыкатель включается устройством защиты (УКО). В качестве воздействующей величины используют ток в нулевом проводе или напряжение обратной последовательности [87]. Основной недостаток этих устройств — необходимость создания искусственных к.з.

Представляют интерес устройства, основанные на использовании трехфазной искусственной системы токов промышленной частоты, например токов второй гармонической, налагаемых на ток в защищаемой линии [88]. В нормальном

режиме линии сумма мгновенных значений этих токов равна нулю, а при обрыве провода — больше нуля. Это различие используется для выполнения защиты. Ее параметры не зависят от токов нагрузки и токов к.з. Поэтому защита может быть выполнена весьма чувствительной к повреждениям, сопровождающимся обрывами проводов. Анализ существующих устройств показывает, что, по существу, нет защит от коротких замыканий на землю. Разработка таких защит для четырехпроводных воздушных линий напряжением до 1 кВ невозможна без достаточно обоснованных расчетов их режимов.

Особый интерес представляет вопрос влияния заземляющих устройств нулевого провода на распределение токов нулевой последовательности. На этот счет существует определенное мнение: повторные заземлители влияют на распределение токов, причем в ряде работ утверждается, что значение тока нулевой последовательности, проходящего через заземлители, может достигать 30—40% тока фазы. Однако достоверность таких расчетов весьма сомнительна. Обычно они выполнялись без учета индуктивных сопротивлений проводов и сопротивления взаимной индукции между ними. В некоторых работах при расчете токов однофазного короткого замыкания в сетях 0,38 кВ использованы выражения, полученные для высоковольтных линий с тросами, хотя схемы замещения этих линий различны [89]. В связи с этим необходимо решить вопрос о схеме нулевой последовательности линий в сетях напряжением до 1 кВ при обрыве проводов, коротких замыканиях между фазным и нулевым проводом и в нормальном режиме работы линии. В [90, 91] обоснована схема замещения нулевой последовательности четырехпроводной линии в этих режимах, и показано, что при рассредоточенной вдоль линии нагрузке заземляющие устройства по существу не влияют на распределение тока нулевой последовательности. Максимальное значение тока в них не превышает 4% тока повреждения. Это говорит о том, что в схему нулевой последовательности заземляющие устройства можно не вводить.

Для линий с сосредоточенной нагрузкой влиянием заземляющих устройств на распределение тока нулевой последовательности пренебрегать нельзя. Как показывают расчеты, наличие на таких линиях заземляющих устройств всегда приводит к значительному увеличению тока в поврежденной фазе и снижению тока на головном участке нулевого провода по сравнению с током, определяемым по известной формуле (см. § 11.3)

$$I_{к\text{ min}}^{(1)} = U_{\phi} / (| \underline{Z}_{\pi} + \underline{Z}_{\tau} / 3 |), \quad (11.12)$$

где \underline{Z}_{π} — полное сопротивление петли фазный провод — нулевой провод; принимается без учета заземляющих устройств нулевого провода.

Заземляющие устройства уменьшают сопротивление \underline{Z}_{π} . Степень уменьшения можно учесть коэффициентом k_z . При этом формула (11.12) примет вид

$$I_{к\text{ min}}^{(1)} = U_{\phi} / (| k_z \underline{Z}_{\pi} + \underline{Z}_{\tau} / 3 |). \quad (11.13)$$

Ток на головном участке нулевого провода I_N меньше тока $I_{к\text{ min}}^{(1)}$ из-за ответвления в заземляющие устройства. Это уменьшение учитывается коэффициентом k_N :

$$I_N = k_N I_{к\text{ min}}^{(1)}. \quad (11.14)$$

Значения коэффициентов k_z и k_N в зависимости от количества заземляющих устройств n представлены в виде графиков на рис. 11.8, а, б. Они получены для возможных сочетаний сечений фазных и нулевого проводов линии длиной не более 1 км при расстоянии между заземляющими устройствами 100 м, сопротивлении каждого из них 10 Ом и сопротивлении заземляющего устройства нейтрали трансформатора 1 Ом. При этих условиях влияние заземляющих устройств максимально. Для реальных соотношений длин линий и сечений проводов ток $I_{к\text{ min}}^{(1)}$ может возрасти на 13%, а ток I_N уменьшится на 16% по сравнению с током, определенным по формуле (11.12).

Что касается расчетов однофазных к.з. на землю, то они затруднительны

из-за неопределенности условий этого вида повреждений. По этой же причине трудно разработать устройство защиты, обладающее достаточной чувствительностью при всех возможных случаях замыканий оборванного провода. Необходимо идти по пути совершенствования существующих и разработки новых защит от обрыва проводов, в том числе нулевого провода. Имеющиеся защиты содер-

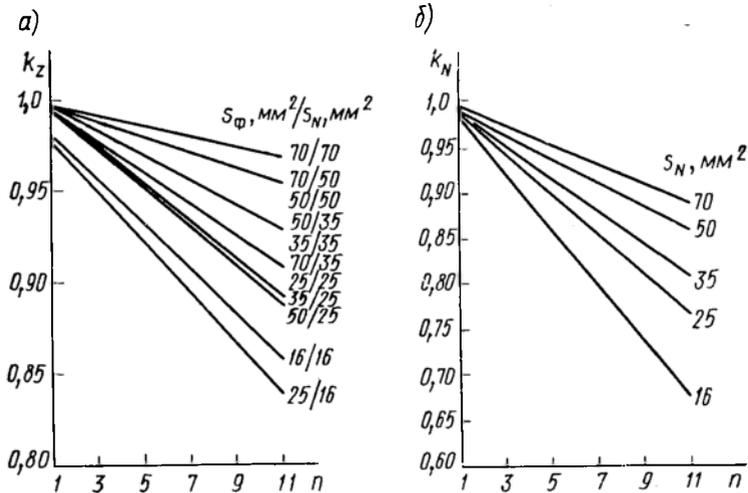


Рис. 11.8. Значения поправочных коэффициентов k_z и k_N при расчете однофазного тока к. з.

жат ряд существенных недостатков. Так, например, устройство УКО создает искусственные к. з. при неполнофазных режимах, оно не реагирует на обрывы нулевого провода.

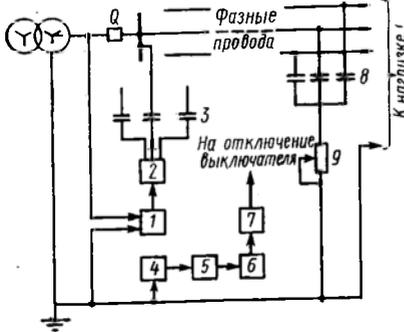


Рис. 11.9. Структурная схема защиты от обрыва проводов и коротких замыканий на нулевой провод

Более совершенна защита, основанная на контроле токов двойной частоты, которые накладываются на токи защищаемой линии. Однако следует заметить, что токи двойной частоты неблагоприятно сказываются на работе электроприемников. Обращает на себя внимание и то, что на линии напряжением 0,38 кВ сельскохозяйственного электроснабжения устанавливаются по крайней мере три защиты: от междуфазных к. з., от однофазного короткого замыкания на нулевой провод и от неполнофазных режимов. Желательно иметь одну универсальную быстродействующую защиту от всех видов однофазных повреждений. Структурная схема предложенной защиты показана на рис. 11.9 [92].

Устройство работает следующим образом. Прямоугольные импульсы частотой 15—25 кГц, вырабатываемые генератором импульсных сигналов 1, посредством распределителя 2 через соответствующие конденсаторы 3 подаются поочередно в фазные провода линии. В конце защищаемой линии установлены конденсаторы 8, создающие цепь для возвращения сигналов по нулевому проводу. В зависимости от характера повреждения линии сигнал может отсутствовать

вообще (обрыв фазного или нулевого провода) или его амплитуда превысит значение амплитуды сигнала нормального режима работы линии (к.з. между фазным и нулевым проводами). Возвращающиеся сигналы проходят через датчик 4, усилитель 5 и сравниваются в элементе 6 с заданным значением сигнала. При повреждениях на выходе элемента 6 появляется сигнал, приводящий к срабатыванию исполнительного органа 7.

§ 11.8. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

В условиях эксплуатации электроустановок не исключается опасность случайных прикосновений человека к токоведущим и нетокковедущим частям, находящимся под напряжением, и поражения его электрическим током. Смертельным для человека является ток I_h , равный 100 мА и более. Случайные прикосновения чаще всего вызывают повреждения на землю через сопротивление тела человека, которое принято считать равным $R_h = 1000$ Ом. При этом в сетях с заземленной нейтралью ток повреждения значительно превышает ток, опасный для человека. В сетях с изолированной нейтралью ток можно ограничить с помощью дугогасящего реактора до неопасного значения. Основная доля электропоражений человека приходится на электроустановки напряжением до 1 кВ, причем в силу особенностей условий эксплуатации повышенная опасность поражения электрическим током имеет место в шахтных участках систем электроснабжения горных предприятий. Поэтому здесь сети напряжением до 1 кВ выполняются с изолированной или компенсированной нейтралью и снабжаются устройствами защитного отключения. Эти устройства отключают электрическую установку при возникновении в ней опасности поражения человека электрическим током. Такая опасность появляется не только при случайных прикосновениях человека к токоведущим частям, но и при снижении сопротивления изоляции, неисправности заземления и неисправности самого устройства защитного отключения. Как показано выше (см. § 7.1), при замыканиях на землю нарушается симметрия фазных напряжений и появляются напряжение и ток нулевой последовательности. При замыкании, например, на корпус электродвигателя корпус оказывается под напряжением относительно земли U_3 . Если корпус заземлен, то появляется ток замыкания I_3 , как и при непосредственном замыкании на землю. Таким образом, при выполнении устройства защитного отключения в качестве входных воздействующих величин можно использовать напряжение корпуса относительно земли либо ток замыкания на землю или, как и у рассмотренных выше защит (см. § 7.2) напряжения фаз относительно земли, либо напряжение и ток нулевой последовательности. Снижение сопротивления изоляции и повреждение заземления не сопровождаются изменением или появлением указанных величин, поэтому для выявления этих неисправностей в качестве воздействующих величин используют переменный, постоянный или выпрямленный ток, источник которого включается между фазными прово-

дами защищаемой электроустановки и землей. Схемы устройств защитных отключений, реагирующих на изменения фазных напряжений, на появление тока и напряжения нулевой последовательности, выполняются аналогично схемам защиты от замыкания на землю (см. § 7.2). Рассмотрим некоторые схемы устройств защитных отключений, использующих другие входные воздействующие величины.

Устройства, реагирующие на напряжение корпуса относительно земли. На рис. 11.10, а корпус электродвигателя заземлен через сопротивление заземлителя R_3 , а реле напряжения KV с большим сопротивлением обмотки Z_p включено между корпусом и вспомогательным заземлителем R_6 , причем $Z_p \gg R_6$. При за-

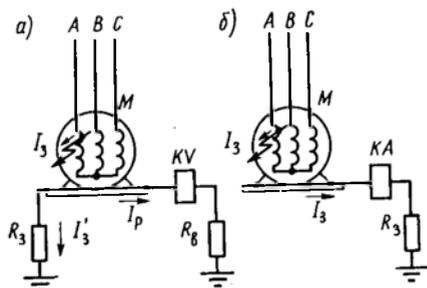


Рис. 11.10. Устройство защитного отключения, реагирующее на напряжение корпуса относительно земли (а) и на ток замыкания на землю (б)

мыкании на корпус он оказывается под напряжением относительно земли U_3 . В этом случае, прикасаясь к корпусу, человек попадает под напряжение прикосновения $U_{пр} = I_h R_h$. Для исключения смертельного исхода необходимо, чтобы при этом ток через тело человека I_h не превышал длительно допустимого значения $I_{h \text{ д.д.}} = 10$ мА. Напряжение прикосновения, соответствующее этому току, называется длительно допустимым напряжением прикосновения $U_{пр \text{ д.д.}}$. В общем случае напряжение прикосновения есть часть напряжения относительно земли $U_{пр \text{ д.д.}} = \alpha_1 U_3$, где $\alpha_1 \leq 1$ — коэффициент прикосновения, определяемый формой заземлителя. Из рис. 11.10, а следует, что $U_3 = I_p (Z_p + R_3)$. При этом напряжение срабатывания реле $U_{с.р.} = I_p Z_p$ определяется исходя из дли-

тельно допустимого напряжения прикосновения $U_{пр \text{ д.д.}} = \alpha_1 I_p (Z_p + R_3)$. Таким образом,

$$U_{с.р.} = U_{пр \text{ д.д.}} Z_p / [\alpha_1 (Z_p + R_3)]. \quad (11.15)$$

Устройство, реагирующее на ток замыкания на землю (рис. 11.10, б). В этой схеме реле тока KA с малым сопротивлением обмотки Z_p включается между корпусом и заземлителем R_3 . При этом в случае замыкания на корпус весь ток замыкания I_3 проходит через обмотку реле. Для условия срабатывания $I_3 = I_{с.р.}$ и $U_3 = I_{с.р.} (Z_p + R_3)$, а напряжение прикосновения не должно превышать значения длительно допустимого напряжения прикосновения $U_{пр \text{ д.д.}} = I_{h \text{ д.д.}} R_h = \alpha_1 U_3$. С учетом этого

$$I_{с.р.} = I_{h \text{ д.д.}} R_h / [\alpha_1 (Z_p + R_3)]. \quad (11.16)$$

Устройства, реагирующие на напряжение U_3 и ток I_3 , могут применяться и в сетях с заземленной нейтралью. В общем случае эти устройства действуют не селективно.

Устройства, реагирующие на ток утечки (реле утечки). Эти устройства снабжаются источниками тока утечки, которые включаются между фазными проводниками электроустановки и землей. Распространены устройства с использованием вентильных схем и устройства на постоянном токе. В устройствах с использованием вентильных схем (рис. 11.11) обмотка реле K , связанная с землей, подключается к фазным проводам через диоды $VD1$ — $VD3$. При этом выпрям-

ленный диодами ток I_p , содержащий значительную переменную составляющую, проходит по обмотке реле и сопротивлениям изоляции фазных проводов $R1-R3$. Во второй схеме (рис. 11.12) обмотка реле K подключается к фазным проводам через последовательно соединенные реакторы $LR1$ и $LR2$. Источником постоянного тока служат вторичная обмотка одной из фаз трехфазного реактора $LR1$ и выпрямитель VS . В этой схеме выпрямленный ток I_p проходит по обмотке реле, последовательно соединенным реактором $LR1$ и $LR2$ и сопротивлениям изоляции $R1-R3$, при этом реакторы значительно ограничивают переменную составляющую выпрямленного тока. Реактор $LR2$ обычно имеет отпайки или обмотку подмагничивания, позволяющие регулировать его индуктивность с целью компенсации емкостного тока замыкания на землю. И в той, и в другой схеме ток утечки в реле зависит от общего омического сопротивления изоляции всех трех фаз $R=R1\parallel R2\parallel R3$. С ухудшением изоляции сопротивление уменьшается, а токи утечки и ток в реле увеличиваются. Таким образом, с помощью этих устройств имеется принципиальная возможность осуществлять постоянный автоматический контроль изоляции электрической сети. Устройства действуют при уменьшении результирующего сопротивления R по любым причинам, в том числе и при замыкании на землю и в случае прикосновения человека к токоведущим частям. Во всех случаях устройства действуют неселективно.

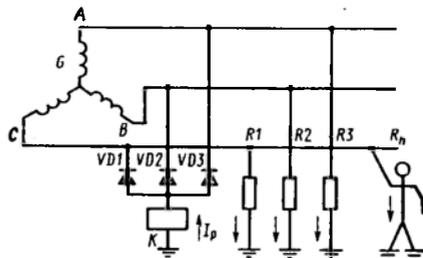


Рис. 11.11. Устройство защитного отключения, реагирующее на ток утечки

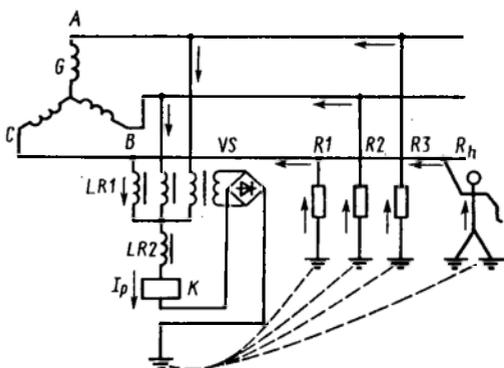


Рис. 11.12. Устройство защитного отключения с компенсацией емкостного тока замыкания на землю

Комбинированные устройства защитного отключения. Обычно устройства защитного отключения выполняют комбинированными, реагирующими на изменения нескольких входных воздействующих величин. В качестве примера на рис. 11.13 показано устройство, в котором использована вентильная схема, дополненная фильтром напряжения нулевой последовательности (резисторы $R4-R6$). При этом ток в реле K определяется не только токами утечки, но и напряжением нулевой последовательности.

Устройство защитного отключения типа АЗШ (аппарат защитного отключения шахтный). Аппарат встраивается в распределительное устройство напряжением до 1 кВ шахтной передвижной трансформаторной подстанции ТСВП и может воздействовать на отключение автоматического выключателя АЗ700. Аппарат состоит из устройства автоматической компенсации емкостной составляющей тока утечки и устройства контроля сопротивления изоляции защищаемой сети (рис. 11.14).

Устройство автоматической компенсации содержит схему измерения емкости сети под напряжением и цепь компенсации, индуктивность которой автоматически изменяется в зависимости от емкости сети. Схема измерения содержит генератор эталонной частоты G , который через конденсатор $C4$

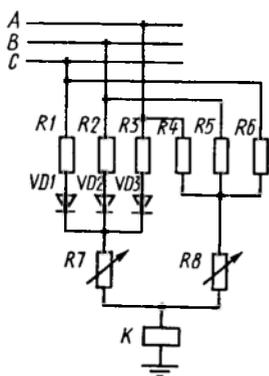


Рис. 11.13. Комбинированное устройство защитного отключения

обусловлен источником постоянного напряжения U_n и содержит неизменную составляющую I и ток утечки I_y , изменяющийся с изменением сопротивления утечки R_y . При бесконечно большом сопротивлении R_y ток утечки $I_y=0$, а ток I_n , равный току I и соизмеримый с импульсами тока $I_{эТ}$, замыкается по цепи: резистор $R3$, рабочая обмотка реактора $LR2$, резисторы $R4$ и $R5$, базэмиттерный переход транзистора $VT2$. При этом через базэмиттерный переход транзистора $VT2$ проходит импульсный ток, который периодически открывает и закрывает

подключается к колебательному контуру, состоящему из конденсатора $C3$, трансформатора $TV1$, емкостного присоединения C и емкости защищаемой сети C_y . Собственная частота колебательного контура зависит от емкости сети. При изменении емкости меняется степень рассогласования собственной частоты контура и эталонной частоты генератора G . Это вызывает изменение амплитуды сигнала, снимаемого со вторичной обмотки трансформатора $TV1$, который усилителем постоянного тока A преобразуется в ток подмагничивания компенсирующего реактора $LR2$, настраивая его в резонанс с емкостью сети. При этом емкостная составляющая тока утечки оказывается скомпенсированной. В цепь компенсации кроме реактора $LR2$ входят также трехфазный реактор $LR1$ и разделительный конденсатор $C5$.

Устройство контроля сопротивления изоляции содержит схему контроля и исполнительный орган. Схема контроля сравнивает ток I_n с заданным эталонным током $I_{эТ}$, представляющим собой импульсы прямоугольной формы. Ток I_n

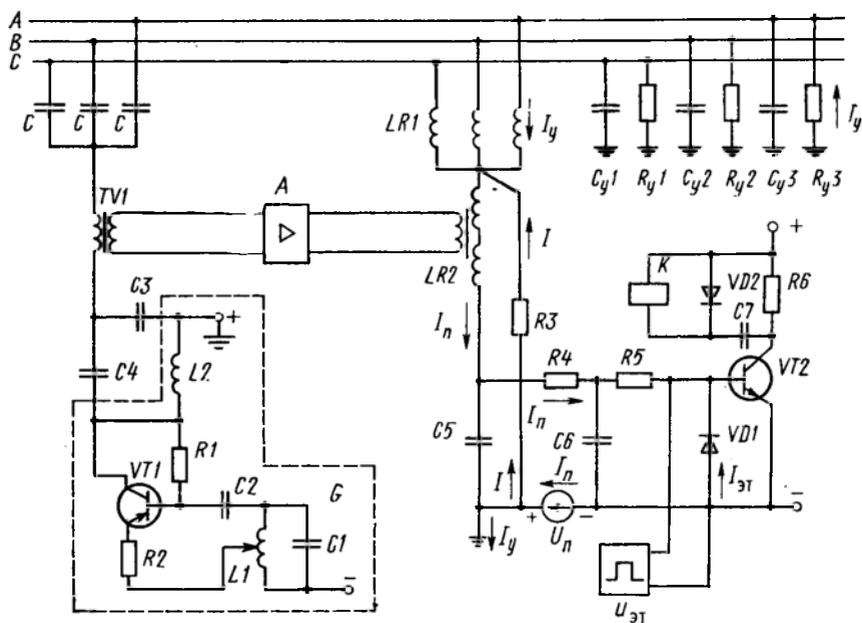


Рис. 11.14. Устройство защитного отключения АЗШ

вает транзистор. Исполнительный орган содержит реле K , диод $VD2$ и конденсатор $C7$. При открытом триоде $VT2$ происходит заряд конденсатора $C7$ через диод $VD2$, который шунтирует обмотку реле K . При закрытом транзисторе конденсатор разряжается через обмотку реле K и резистор $R6$.

Таким образом, периодическое переключение транзистора $VT2$ сопровождается зарядом и разрядом конденсатора $C7$. При этом среднее значение разрядного тока превышает ток срабатывания реле K и оно находится в состоянии после срабатывания. По мере снижения сопротивления изоляции R_y ток утечки I_y и ток I_n увеличиваются. При определенном значении I_n транзистор $VT2$ находится в открытом состоянии. Конденсатор $C7$ при этом разрядиться не может и реле K возвращается в исходное состояние, отключая автоматический выключатель. Для повышения устойчивости работы устройства контроля изоляции при переходных процессах, вызванных коммутационными переключениями в сети, вход транзистора $VT2$ подключается к разделительному конденсатору $C5$ через RC -фильтр (резисторы $R4, R5$ и конденсатор $C6$).

§ 11.9. КОМБИНИРОВАННОЕ УСТРОЙСТВО ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЯЕМОГО ПРЕДОХРАНИТЕЛЯ

Управляемый предохранитель имеет привод, на который практически может воздействовать любая релейная защита. Однако в сетях напряжением до 1 кВ экономически оправдано применение простейшей защиты, имеющей лучшие, чем у предохранителей и расцепителей автоматических выключателей, защитные характеристики. Недостатком токовых защит является, в частности, их реагирование только на ток, они не реагируют на температуру нагрева проводников защищаемой линии, поэтому практически невозможно получить требуемую по условиям нагрева проводников защитную характеристику.

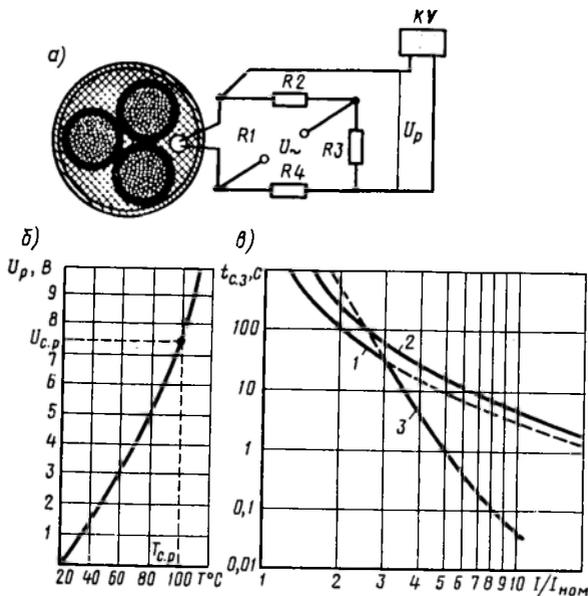


Рис. 11.15. Схема и характеристики защиты, работающей совместно с управляемыми предохранителями

Более приемлемую защитную характеристику имеет защита, непосредственно реагирующая на температуру нагрева проводников, т. е. температурная защита. Одна из схем такой защиты показана на рис. 11.15, а. Терморезистор $R1$ с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления вмонтирован в защищаемую кабельную линию; его температура равна температуре изоляции жил кабеля. С повышением температуры сопротивление терморезистора уменьшается, а напряжение U_p на выходе моста $R1-R4$, в одно из плеч которого включен терморезистор, увеличивается (рис. 11.15, б): мост подключен к напряжению U_{\sim} питания. Напряжение срабатывания реле $U_{с.р}$ выбирается исходя из допустимой температуры нагрева — температуры срабатывания реле $T_{с.р}$. При $T_{с.р} = 100^\circ\text{C}$ напряжение $U_{с.р} = 7,5$ В.

Для этого случая на рис. 11.15, в даны защитная характеристика 1, расчетная характеристика 2, рекомендуемая для всех проводников, и защитная характеристика 3 предохранителя ПН-2. Совместная работа температурной защиты и управляемого предохранителя, рассмотренного выше (см. § 4.3), позволяет получить комбинированную защитную характеристику. При перегрузках кабель надежно защищается температурной защитой (характеристика 1), воздействующей на привод управляемого предохранителя. Короткие замыкания отключаются в соответствии с защитной характеристикой 3 предохранителя, так как начиная с трехкратного значения тока плавкая вставка перегорает раньше, чем срабатывает защита.

§ 11.10. УСТРОЙСТВА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗЕРВА В СЕТЯХ НАПЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

В установках напряжением до 1 кВ устройства АВР наиболее просто выполняют на контакторах. В этом случае дополнительный пусковой орган не требуется, так как при исчезновении или снижении

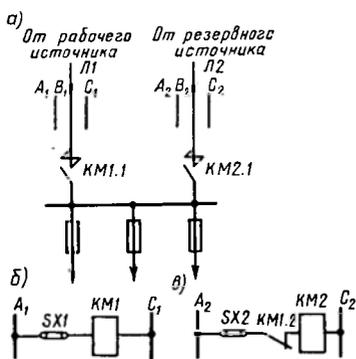


Рис. 11.16. Схемы сети и устройства АВР с использованием контакторов

напряжения на резервируемой линии контактор отключается самостоятельно. В схеме на рис. 11.16, а, б, в потребитель получает питание от рабочего источника по линии $L1$. Контакт КМ1 удерживается во включенном положении катушкой, которая находится под полным рабочим напряжением линии. При этом его вспомогательный контакт КМ1.2 в цепи катушки контактора КМ2 разомкнут, поэтому контактор КМ2 отключен. Он включается и переводит питание на резервный источник только при отключенном контакторе КМ1, когда замкнется вспомогательный контакт КМ1.2. Контакт КМ1 отключается при исчезновении напряжения на линии $L1$, так как при этом прекращается питание его удерживающей катушки. Устройство АВР автоматически восстанавливает питание от рабочего источника после появления напряжения на линии $L1$. На время ремонта шин накладки $SX1$ и $SX2$ снимаются.

С помощью контакторов можно выполнить и более сложные схемы автоматики, например УАВР двустороннего действия (рис. 11.17). Нормально контакторы *КМ1* и *КМ3* включены, при этом подстанция *А* получает питание по линии *Л1*, а подстанция *Б* — по линии *Л2*. Линия *Л3* — резервная, нормально она включена только на одной из подстанций, например на подстанции *А*. Схема УАВР выполнена так, что обеспечивается автоматическое включение резервного питания любой из подстанций при отключении ее питающей линии.

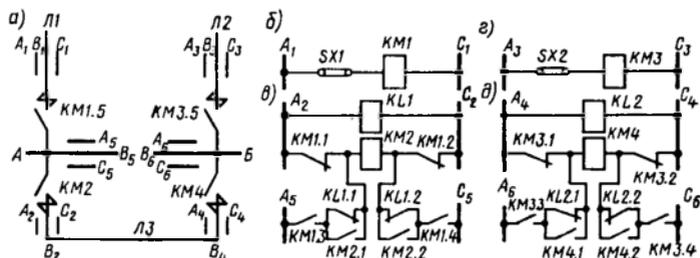


Рис. 11.17. Схемы устройства АВР двустороннего действия с использованием контакторов

Схема работает следующим образом. При исчезновении напряжения, например на линии *Л2* и шинах подстанции *Б*, удерживающая катушка контактора *КМ3* обесточивается и контактор отключается (рис. 11.17, а, з). При этом его вспомогательные контакты *КМ3.1* и *КМ3.2* в цепи удерживающей катушки контактора *КМ4* замыкаются, а вспомогательные контакты *КМ3.3* и *КМ3.4* размыкаются (рис. 11.17, д). Так как резервная линия *Л3* находится под напряжением со стороны подстанции *А*, то контактор *КМ4* включается и удерживается во включенном состоянии, его вспомогательные контакты *КМ4.1* и *КМ4.2* замыкаются, а контакты *КЛ2.1* и *КЛ2.2* промежуточного реле *КЛ2* остаются разомкнутыми. Подстанция *Б* получает питание по резервной линии. При восстановлении напряжения на линии *Л2* автоматически включается контактор *КМ3*, его вспомогательные контакты *КМ3.1* и *КМ3.2* разрывают цепь удерживающей катушки контактора *КМ4* и он отключается. Схема приходит в исходное состояние. В данном случае устройство АВР действует без участия промежуточного реле *КЛ2*.

Необходимость наличия реле *КЛ2* в схеме УАВР проявляется в случае исчезновения напряжения на линии *Л1*. При этом несмотря на отключение контактора *КМ1* (рис. 11.17, б) и замыкание его вспомогательных контактов *КМ1.1* и *КМ1.2* в цепи удерживающей катушки контактора *КМ2*, последний включиться не может, так как исчезает напряжение и на шинах подстанции *А* и на резервной линии *Л3*. Состояние схемы включения катушки контактора *КМ2* для данного случая показано на рис. 11.17, в. На подстанции *Б* контактор *КМ3* включен и на шинах имеется напряжение. Вспомогательные контакты *КМ3.1* и *КМ3.2* (рис. 11.17, д) разомкнуты, а вспомогательные контакты *КМ3.3* и *КМ3.4* замкнуты. При исчезновении напряжения на линии *Л3* реле *КЛ2* обесточивается и замыкает контакты *КЛ2.1* и *КЛ2.2*. Контактор *КМ4* включается и на линию *Л3* подается напряжение. При этом реле срабатывает и размыкает контакты *КЛ2.1* и *КЛ2.2*, а контактор *КМ4* остается включенным, так как цепь его удерживающей катушки замкнута вспомогательными контактами *КМ3.3*, *КМ3.4*, *КМ4.1* и *КМ4.2*.

Появление напряжения на линии *Л3* сопровождается включением контактора *КМ2* на подстанции *А*. Таким образом обеспечивается резервное питание подстанции *А* при исчезновении напряжения на линии *Л1*.

Полное время действия рассмотренных схем АВР (время отключения рабочего и время включения резервного контактора) составляет $t_{\text{АВР}}=0,2...0,3$ с. При этом кратковременные снижения напряжения вследствие короткого замыкания в сети не вызывают срабатывания устройства АВР, так как время перегорания предохранителей на поврежденном участке сети меньше времени отключения контактора.

Недостатком рассмотренных схем является возможность многократных включений резервной линии на поврежденные шины, если предохранитель этой линии в цикле АВР не успеет перегореть. Недостаток состоит и в том, что во включенном положении контактор удерживается катушкой, находящейся под полным рабочим напряжением. При этом магнитная система контактора создает излишний нагрев, вибрацию и гудение. В ряде случаев это недопустимо. Кроме того, катушки контакторов создают дополнительные потери электроэнергии. Указанные недостатки отсутствуют в устройствах АВР, использующих контакторы с механической защелкой, которая удерживает контактор во включенном положении и при обесточенной катушке.

3

РАЗДЕЛ

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕМЕНТОВ СТАНЦИЙ, ПОДСТАНЦИЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

На элементах станций и подстанций и на специальных электроустановках используются рассмотренные выше защиты. Однако условия их функционирования отличаются от условия функционирования защиты линий электропередачи. Дело в том, что элементы электрических станций и подстанций — электрические машины, трансформаторы — и специальные электроустановки являются сложными устройствами. Их нормальные режимы работы могут сопровождаться значительным возрастанием токов.

Например, при пуске электродвигателя и включении трансформатора пусковой ток и бросок тока намагничивания могут достигать значений токов аварийного режима. Или другой пример. При нормальной работе электродуговой плавильной установки возможны частые эксплуатационные короткие замыкания электродов на металл, которые не являются повреждениями. В этих нормальных режимах защита не должна срабатывать. Для достижения этого приходится усложнять ее схему, вводить различные блокировки, использовать более сложные реле, а при расчете параметра срабатывания защиты учитывать дополнительные условия, связанные с особенностями нормальных режимов работы защищаемого элемента.

Из средств автоматики на электрических станциях и подстанциях наряду с рассмотренными выше УАПВ, УАВР и УАЧР применяют и другие устройства, например автоматического регулирования возбуждения и автоматической или полуавтоматической синхронизации на генераторах, автоматического регулирования напряжения на трансформаторах с РПН.

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ**§ 12.1. ПОВРЕЖДЕНИЯ И НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ,
УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ**

В процессе эксплуатации синхронных генераторов возможны повреждения обмоток статора и ротора, а также ненормальные режимы работы.

К повреждениям обмотки статора относятся многофазные короткие замыкания, однофазные замыкания на землю, двойные замыкания на землю, одно из которых возникло в обмотке статора, а второе — во внешней сети, и замыкания между витками одной фазы. Наиболее опасны многофазные короткие замыкания. Они сопровождаются большими токами, при этом электрическая дуга в месте повреждения может привести не только к разрушению изоляции обмотки, но и к выплавлению значительного количества стали магнитопровода статора, что усложняет и удорожает ремонт генератора. Для ограничения размеров повреждения на генераторе предусматривается быстродействующая защита от многофазных коротких замыканий. Принципы ее выполнения определяются номинальным напряжением и мощностью генератора [3].

Генераторы с номинальным напряжением выше 1 кВ работают в сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтральными. Поэтому однофазные замыкания на землю в обмотке статора сопровождаются токами повреждения, которые значительно меньше номинальных токов. При токах замыкания на землю $I_3 = 5$ А и более защита от замыкания на землю должна действовать на отключение. Если ток повреждения $I_3 < 5$ А, то защита действует на сигнал. Для выполнения защиты от замыкания на землю обмотки статора используются принципы, рассмотренные выше (см. § 7.2, 7.4). При этом в зависимости от того, работает ли генератор непосредственно на сборные шины или в блоке с трансформатором, защита выполняется по-разному. Если защита от замыкания на землю генератора, работающего на сборные шины, оказывается нечувствительной или не устанавливается по другим причинам, то в качестве его защиты от замыкания на землю используется установленное на шинах и действующее на сигнал устройство общей неселективной сигнализации (см. § 7.2). В сетях напряжением до 1 кВ генераторы имеют заземленные нейтрали и токи однофазного короткого замыкания в обмотке статора значительны. Поэтому защита должна действовать на отключение. Если защита от многофазных к. з. выполняется двухфазной, то обязательно предусматривается токовая защита от двойных замыканий

на землю. Она обычно реагирует на ток нулевой последовательности и подключается к ТНП защиты от замыкания на землю.

Замыкания между витками одной фазы возникают реже, чем другие повреждения, однако они могут приводить к таким же последствиям, что и многофазные короткие замыкания. Поэтому желательно иметь совершенную защиту от этого вида повреждения обмотки статора. Наиболее просто такая защита выполняется на генераторах, имеющих отдельные выводы параллельных ветвей фаз.

К повреждениям обмотки ротора относятся замыкания на землю в одной и второй точках. Так как цепи возбуждения выполняются изолированными от земли, то замыкание на землю является замыканием на магнитопровод ротора и ограничивается системой возбуждения данного генератора. Поэтому при замыкании в одной точке режим работы цепи возбуждения остается неизменным, а через место повреждения ток не проходит. Такое повреждение опасности для генератора не представляет. Опасно замыкание во второй точке. При этом часть обмотки ротора, находящаяся между точками повреждения, оказывается закороченной, в связи с чем ток в обмотке возрастает и перегревает ее, а магнитный поток обмотки ротора искажается, вызывая вибрацию ротора. Эти вибрации особенно опасны для явнополюсных машин — гидрогенераторов. Появление замыкания во второй точке для них нежелательно, поэтому на гидрогенераторах устанавливается защита от замыкания в одной точке, действующая на сигнал. При появлении сигнала принимают меры по выводу из работы поврежденной машины. На турбогенераторах такую защиту не устанавливают. Состояние изоляции цепей возбуждения периодически контролируют замерами ее сопротивления. При обнаружении замыкания в одной точке обмотки ротора на поврежденном турбогенераторе устанавливают защиту от замыкания во второй точке. Она выполняется в одном комплекте на несколько (но не более трех) генераторов с близкими параметрами цепей возбуждения.

Основными ненормальными режимами синхронных генераторов являются: прохождение сверхтоков при симметричной и несимметричной перегрузках; прохождение сверхтоков при внешних коротких замыканиях; повышение напряжения; асинхронный режим с потерей возбуждения; перегрузка обмотки ротора током возбуждения (для генераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток).

Симметричные перегрузки генераторов могут возникать при отключении или отделении параллельно работающих генераторов, при самозапуске электродвигателей, при толчках нагрузки, обусловленных технологическими процессами у потребителей, и по некоторым другим причинам. Опасность перегрузок состоит в том, что они вызывают перегрев изоляции и даже приводят к ее разрушению. Некоторое время после возникновения перегруз-

ки генератор целесообразно оставить в работе, так как температура изоляции не может мгновенно возрасти. Допустимое время перегрузки зависит от ее степени. Например, для генераторов некоторых типов 10%-ная перегрузка допустима в течение 1 ч, а двукратная — лишь в течение 1 мин. Защита от симметричной перегрузки на электрических станциях с постоянным дежурством персонала действует на сигнал, а на электрических станциях без дежурного персонала — на отключение или автоматическую разгрузку.

Несимметричные перегрузки могут возникать при неполнофазном режиме работы сети генераторного напряжения и при значительной однофазной нагрузке.

Содержащиеся в несимметричных токах составляющие обратной последовательности создают магнитное поле, вращающееся встречно относительно направления вращения ротора, поэтому в обмотке ротора индуцируются токи, дополнительно нагревающие ее. Кроме того, возникающий пульсирующий момент вызывает вибрацию генератора. Длительно допустимым считается неравенство токов в фазах, не превышающее 10% для турбогенераторов и 20% для гидрогенераторов, при условии, что ни в одной из фаз ток не превышает номинального значения. Несимметрия большей степени допустима в течение ограниченного времени, тем меньше, чем больше ток обратной последовательности. Для ликвидации недопустимой несимметрии служит защита от перегрузки токами обратной последовательности.

Токи внешних коротких замыканий, как и токи перегрузки, вызывают перегрев генератора. Несимметричные короткие замыкания опасны влиянием значительных токов обратной последовательности. Нормально внешние к.з. должны ликвидироваться защитой поврежденных элементов. Учитывая возможность отказа защиты или выключателя, на который она действует, генераторы снабжают защитой от внешних коротких замыканий с действием на отключение. В зависимости от номинальных напряжения и мощности генератора защита выполняется по-разному.

Повышение напряжения генератора возникает при внезапном сбросе его нагрузки, так как у разгруженного генератора частота вращения ротора возрастает. У паровых турбин регуляторы частоты вращения являются быстродействующими и повышение частоты вращения, а значит и напряжения турбогенераторов, оказывается небольшим и кратковременным. У гидротурбин регуляторы частоты вращения действуют медленно, и напряжение гидрогенератора при сбросе нагрузки может быстро возрасти в полтора-два раза по сравнению с номинальным напряжением. Поэтому гидрогенераторы имеют защиты от повышения напряжения.

Асинхронный режим с потерей возбуждения для генераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток может быть недопустимым. В таких случаях рекомендуется

иметь защиту от этого режима. Допускается об асинхронном режиме и потере возбуждения судить только по положению устройства АГП. При случайном отключении УАГП осуществляется разгрузка генератора или его отключение. Если асинхронный режим допускается, то подается сигнал о потере возбуждения.

Перегрузка обмотки ротора током возбуждения может возникнуть, например, при длительной форсировке возбуждения. Перегрузка опасна для мощных турбогенераторов с непосредственным охлаждением проводников обмоток, поэтому необходима разгрузка ротора или отключение генератора. Для этого предусматривается защита с независимой или зависимой выдержкой времени, реагирующая на повышение напряжения или тока в обмотке ротора. С меньшей выдержкой времени защита производит разгрузку ротора, а с большей — отключает генератор.

Особенность защит генератора, действующих на отключение, состоит в том, что они должны не только отделить поврежденный генератор от сети генераторного напряжения, но и прекратить прохождение тока возбуждения, поэтому при срабатывании защита действует на отключение выключателя и *на устройство (автомат) гашения поля* (АГП) возбуждения генератора.

Некоторые из указанных защит устанавливаются не на всех генераторах. Это определяется напряжением, мощностью и характером заземления нейтрали генератора. Так, например, для генераторов напряжением до 1 кВ и мощностью до 1 МВт в связи с высоким запасом изоляции защита выполняется упрощенно. Обычно это токовая защита от всех видов повреждений и ненормальных режимов. Применяются также плавкие предохранители. В связи с этим ниже защиты высоковольтных и защиты низковольтных синхронных генераторов рассматриваются отдельно.

Наряду с защитой на синхронных генераторах имеются устройства автоматики. Одним из средств поддержания напряжения в системе электроснабжения является *автоматическое регулирование возбуждения* генераторов. Для этого генераторы снабжают устройствами автоматического регулирования возбуждения (АРВ). Для включения генераторов на параллельную работу служат устройства *автоматической и полуавтоматической синхронизации* (АС). На генераторах электрических станций, и прежде всего на гидрогенераторах, применяются и другие виды автоматики, которые здесь не рассматриваются.

§ 12.2. ЗАЩИТА ОТ МНОГОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ

Для генераторов небольшой мощности ($P_r < 1,0$ МВт), работающих параллельно с другими генераторами или электрической системой, в качестве защиты от многофазных коротких замыканий предусматривается токовая отсечка без выдержки времени, уста-

навливаемая со стороны выводов генератора к сборным шинам. Если чувствительность токовой отсечки оказывается недостаточной, то допускается устанавливать продольную дифференциальную защиту. Для одиночно работающих генераторов небольшой мощности допускается использовать максимальную токовую защиту, устанавливаемую со стороны нейтрали. При отсутствии выводов отдельных фаз со стороны нейтрали в качестве защиты от многофазных коротких замыканий можно использовать минимальную защиту напряжения. На генераторах мощностью P_r более 1,0 МВт основной защитой от многофазных коротких замыканий является продольная дифференциальная защита.

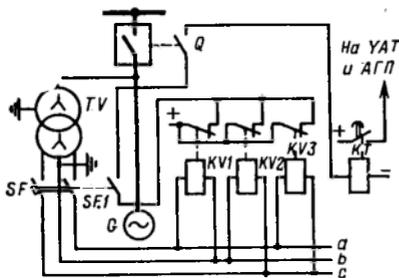


Рис. 12.1. Минимальная защита напряжения генератора

рассматривается двухфазное короткое замыкание у места установки защиты (на шинах) в минимальном режиме работы системы электроснабжения. В этом случае $I_{k \min}$ [см. § 5.2, выражение (5.1)] — ток от системы. Минимальный коэффициент чувствительности допускается $k_{\text{ч}} \geq 2,0$.

Максимальная токовая защита выполняется двухфазной двухрелейной и двухфазной однорелейной аналогично максимальной токовой защите линий (см. § 5.5). Ее ток срабатывания должен удовлетворять условию (5.7), в котором $I_{\text{раб max}}$ принимается равным номинальному току генератора, т. е.

$$I_{\text{отс}}^{\text{III}} = k_{\text{отс}}^{\text{III}} k_{\text{сзп}} I_{\text{г.ном}} / k_{\text{н}}, \quad (12.1)$$

где $k_{\text{сзп}} = 1,5 \dots 1,7$ — коэффициент самозапуска, учитывающий повышение тока при самозапуске электродвигателей после отключения внешнего короткого замыкания.

Выдержку времени защиты выбирают, как обычно, по ступенчатому принципу. Чувствительность защиты считают достаточной, если при двухфазных коротких замыканиях на выводах одиночно работающего генератора коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} \geq 1,5$.

В минимальной защите напряжения (рис. 12.1) используются три минимальных реле напряжения $KV1-KV3$ типа РН-54, подключенных к трансформатору напряжения TV через автоматический воздушный выключатель SF . При отключении автоматического выключателя защита вспомогательным контактом $SF.1$ выво-

дится из действия. Напряжение срабатывания защиты определяется исходя из двух условий:

а) отстройка от режима самозапуска электродвигателей после отключения внешнего короткого замыкания

$$U_{с.з} \leq U_{\text{раб мпн}} / (k_{\text{отс}} k_{\text{в}} k_{\text{сзп}}), \quad (12.2)$$

где $k_{\text{отс}} = 1,2$ — коэффициент отстройки; $k_{\text{в}} = 1,25$ — коэффициент возврата; $k_{\text{сзп}}$ — коэффициент самозапуска, учитывающий понижение напряжения при самозапуске электродвигателей после отключения внешнего к. з.; приближенно принимается $U_{с.з} \leq (0,6 \dots 0,7) U_{\text{г. ном}}$;

б) отстройка от понижения напряжения при потере возбуждения — учитывается только для турбогенераторов, которые могут самосинхронизироваться; при этом принимается

$$U_{с.з} \approx (0,5 \dots 0,6) U_{\text{г. ном}}. \quad (12.3)$$

Таким образом, для защиты гидрогенератора расчетным является условие (12.2), а для защиты турбогенератора — условие (12.3).

Выдержка времени берется больше максимального времени $t_{\text{эл макс}}$ действия защит предыдущих элементов: $t_{с.з} = t_{\text{эл макс}} + \Delta t$. Чувствительность защиты проверяется при трехфазном коротком замыкании в конце зоны резервирования, при этом междуфазное напряжение в месте установки защиты $U_{\text{к макс}}^{(3)}$ должно быть таким, чтобы коэффициент чувствительности $k_{\text{чУ}} = U_{с.з} / U_{\text{к макс}}^{(3)}$ был не менее $k_{\text{чУ}} = 1,2$.

Продольная дифференциальная защита выполняется в виде двухфазной двухрелейной (рис. 12.2) и трехфазной трехрелейной (рис. 12.3). Недостатком защиты в двухфазном исполнении является то, что она не может отключать двойные замыкания на зем-

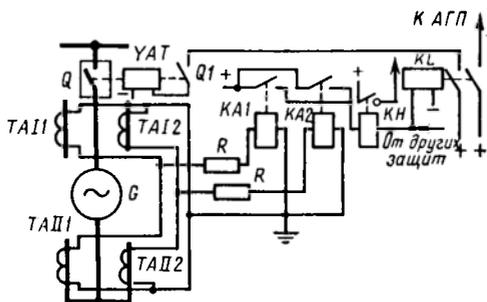


Рис. 12.2. Продольная дифференциальная защита генератора с реле РТ-40

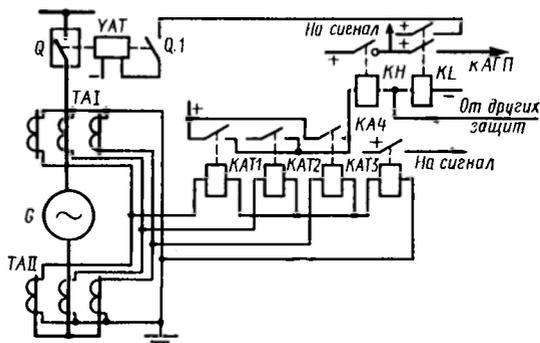


Рис. 12.3. Продольная дифференциальная защита генератора с реле, включенными через промежуточные насыщающиеся трансформаторы тока

лю, если одно из мест повреждения находится в сети генераторного напряжения, а второе — в фазе генератора, не имеющей трансформаторов тока. В двухфазном двухрелейном виде допускается выполнять дифференциальную защиту генераторов мощностью до 30 МВт, но при наличии защиты от двойных замыканий на землю.

Для выполнения защиты используют трансформаторы тока $TAI1$, $TAI2$, установленные со стороны шинных выводов, и $TAIII$, $TAII2$ со стороны нейтрали. Трансформаторы тока $TAI1$, $TAI2$ располагают у генераторного выключателя так, что в зону действия защиты входит не только обмотка статора, но и соединения генератора с выключателем. Трансформаторы тока выбирают с одинаковыми коэффициентами трансформации в связи с равенством сравниваемых первичных токов в нормальном режиме работы генератора. Защитное заземление вторичных цепей трансформаторов тока выполняется общим в одном месте у реле. В зависимости от мощности генератора в схеме защиты используют различные реле — реле прямого действия типа РТМ, реле $KA1$, $KA2$ косвенного действия типа РТ-40 (рис. 12.2), реле с промежуточным насыщающимся трансформатором тока (реле KAT типа РНТ) (рис. 12.3). В ряде случаев для мощных генераторов применяют реле с торможением [93].

Расчет продольной дифференциальной защиты в общем случае сводится к определению тока срабатывания и коэффициента чувствительности. Ток срабатывания продольной дифференциальной защиты, как известно, должен удовлетворять условию (9.3):

$$I_{с.з} = k_{отс} K_I I_{нб.рсч\ max}$$

Для определения $I_{нб.рсч\ max}$ рассматривают два режима [19]:

трехфазное короткое замыкание на шинах генераторного напряжения (при $t=0$), при этом (см. § 9.3)

$$I_{нб.рсч\ max} = k_{одн} k_{ап} \varepsilon I_{к.ин\ max}^{(3)} / (100 K_I);$$

асинхронный режим, при котором

$$I_{нб.рсч\ max} = k_{одн} k_{ап} \varepsilon I_{ур\ max} / (100 K_I),$$

где $I_{ур\ max}$ определяется, как и при выборе тока срабатывания токовой отсечки без выдержки времени (см. § 5.3).

При выборе тока срабатывания принимается большее из двух найденных значений тока небаланса. Для уменьшения $I_{нб.рсч\ max}$ трансформаторы тока подбирают с мало отличающимися характеристиками намагничивания, сопротивления плеч защиты выравнивают подбором сечения соединительных проводов, при этом последовательно с реле тока включают добавочные резисторы сопротивлением $R=5 \dots 10$ Ом (рис. 12.2) или применяют реле типа РНТ (рис. 12.3). В приведенных выражениях коэффициенты $k_{отс} = 1,3$, $k_{одн} = 0,5$ и $\varepsilon = 10\%$. Для реле типа РТМ и реле тока с добавочным резистором коэффициент $k_{ап} = 1,5 \dots 2$, а для реле типа

РНТ $k_{ап} = 1,0 \dots 1,3$. При этом ток срабатывания защиты не должен превышать $0,6I_{г.ном}$. Для генераторов мощностью до 30 МВт с косвенным охлаждением допускается выполнять защиту с током срабатывания $(1,3 \dots 1,4)I_{г.ном}$ [3]. В дифференциальной защите генератора расчетные вторичные токи по концам защищаемой зоны одинаковы и необходимость в их выравнивании отпадает, поэтому в случае применения реле РНТ, имеющего рабочую (дифференциальную) и уравнительные обмотки (см. § 2.3), в схеме дифференциальной защиты уравнительные обмотки не используются. Расчет сводится к определению числа витков рабочей обмотки:

$$\omega_{раб} = \omega_{диф} = F_{с.р}/I_{с.р} = F_{с.р}K_I/(k_{сх}I_{с.з}),$$

где $F_{с.р} = 100$ А — МДС срабатывания реле.

В нулевой провод схемы защиты с реле типа РНТ в трехфазном исполнении (рис. 12.3) включено реле КА4, сигнализирующее о появлении обрыва во вторичных цепях трансформаторов тока. Ток срабатывания реле принимается $I_{с.р} = 0,2I_{г.ном}/K_I$. Для исключения срабатывания сигнализации при внешних коротких замыканиях ее выдержка времени должна быть больше выдержки времени защиты генератора от внешних коротких замыканий. Сигнализация необходима, если при обрывах проводов дифференциальная защита не срабатывает. Это обеспечивается при $I_{с.з} > I_{г.ном}$. Ток срабатывания защиты, отстроенный от $I_{нб.реч\ max}$, практически всегда меньше номинального тока генератора. Однако вероятность обрывов проводов мала, поэтому специальные устройства, предотвращающие ложные срабатывания защиты, не предусматриваются. Для этой цели можно применить специальную схему включения реле КАТ с использованием уравнительных обмоток [94].

Чувствительность продольной дифференциальной защиты проверяют при двухфазном кратком замыкании на выводах генератора. При этом ток $I^{(2)}_{к\ min}$ находят для двух возможных режимов: одиночно работающего генератора, когда ток к месту повреждения идет только от генератора; включения генератора в сеть методом самосинхронизации, когда к месту повреждения ток подходит только из сети. Условию $k_{ч} \geq 2,0$ должен удовлетворять меньший из двух найденных токов.

§ 12.3. ЗАЩИТА ОТ ОДНОФАЗНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ОБМОТКЕ СТАТОРА ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ

Защита от замыканий на землю. На генераторах, работающих непосредственно на шины, в качестве защиты от замыканий на землю в обмотке статора используют токовую защиту нулевой последовательности, реагирующую на токи установившегося режима. Защита подключается к трансформатору ТАЗ тока нулевой последовательности (ТНП), установленному со стороны шинных выводов генератора. При повреждении в обмотке статора из сети в

точку замыкания на землю направляется ток нулевой последовательности $3I^{(1)}_{0 \text{ эк}}$, который определяется емкостью всех неповрежденных элементов схемы генераторного напряжения $C_{0 \text{ эк}}$. При внешних однофазных замыканиях на землю от генератора в сеть проходит ток $3I^{(1)}_{0 \text{ Г}}$, обусловленный емкостью генератора $C_{0 \text{ Г}}$. Обычно $I^{(1)}_{0 \text{ эк}} > I^{(1)}_{0 \text{ Г}}$. Это позволяет использовать токовый принцип для выполнения селективной с достаточной чувствительностью защиты. На генераторах небольшой мощности она выполняется аналогично защите от замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью (см. § 7.2). При этом ток срабатывания защиты

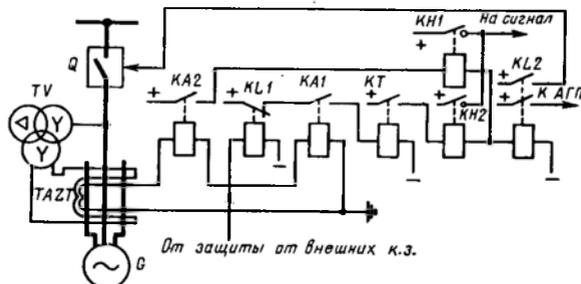


Рис. 12.4. Защита от замыканий на землю с ТНП, имеющими подмагничивание

не должен превышать $I_{с.з.} = 5 \text{ А}$. Для генераторов мощностью $P_{\text{Г}} > 1,0 \text{ МВт}$ для повышения чувствительности защиты применяют трансформатор тока нулевой последовательности с подмагничиванием, рассмотренный выше (см. § 1.7).

При внешних многофазных коротких замыканиях в реле, подключенном к ТНП, появляется большой ток небаланса. Отстройка по току срабатывания от токов небаланса при внешних коротких замыканиях недопустимо загрубляет защиту генератора от замыканий на землю. Чтобы не загрублять защиту, ее выводят из действия защитой генератора от внешних коротких замыканий, но при этом она оказывается выведенной и при двойных замыканиях на землю. Поэтому на генераторе предусматривают защиту от двойных замыканий на землю, когда одно из них находится в сети. Она обычно объединяется с защитой от замыканий на землю в обмотке статора генератора. Получается устройство, содержащее два реле тока разной чувствительности, подключенных к одному ТНП. Принципиальная схема такой комбинированной защиты от однофазных и двойных замыканий на землю с использованием ТНП с подмагничиванием TAZT показана на рис. 12.4. Чувствительное реле KA1 действует на отключение с выдержкой времени $t_{с.з.} = 1 \dots 2 \text{ с}$, создаваемой реле KT для отстройки от переходных значений емкостного тока при внешних коротких замыканиях на землю. Реле KL1 является запрещающим: оно размыкает оперативную цепь реле KA1 при внешних коротких замы-

каниях. Грубое реле *КА2* действует на отключение без выдержки времени.

Ток срабатывания чувствительного комплекта защиты выбирают с учетом того, что одновременно с однофазным замыканием на одном из присоединений к шинам может возникнуть двухфазное к.з. между другими фазами другого присоединения, отключаемое с выдержкой времени, большей времени действия чувствительного комплекта. Таким образом, ток срабатывания $I_{с.з1}$ необходимо отстроить от тока, содержащего емкостный ток генератора и ток небаланса, обусловленный внешним двухфазным к.з. [93]

$$I_{с.з1} = (k'_{отс} I_{сг} + k''_{отс} I_{нб1}) / k_{в}, \quad (12.4)$$

где $I_{сг} = 3I_{0г} = 3\omega C_{г} U_{г.ном} / \sqrt{3}$ — установившийся емкостный ток замыкания на землю защищаемого генератора (приводится в его паспортных данных), А; $I_{нб1}$ — ток небаланса защиты, соответствующий току срабатывания защиты от внешних многофазных коротких замыканий, А; $k'_{отс} = 2 \dots 3$ и $k''_{отс} = 1,3 \dots 1,5$ — коэффициенты отстройки, учитывающие соответственно броски емкостного тока в неустановившемся режиме и неточность расчета тока небаланса.

Ток срабатывания грубого комплекта защиты отстраивается от максимального тока в реле при внешних коротких замыканиях. Обычно принимают $I_{с.з2} = 100$ А, что соответствует отстройке от указанного тока со значительным запасом [95].

Рассмотрев эквивалентную схему ТНП (см. рис. 1.17, в), можно получить связь между первичным током срабатывания $I_{с.з}$ и током срабатывания реле:

$$I_{с.р} = I_{с.з} \underline{Z}'_{эк.нам} / (|\underline{Z}'_{эк.нам} + \underline{Z}_p| \omega_2). \quad (12.5)$$

Подстановкой в (12.5) токов $I_{с.з1}$ и $I_{с.з2}$ определяются токи срабатывания реле *КА1* и *КА2*. Достоинство рассмотренной защиты с ТНП состоит в ее высокой чувствительности; недостатки защиты — в ее сложности и наличии мертвой зоны при повреждениях у нейтрали генератора.

Защита от замыканий между витками одной фазы. Способы выполнения защит генераторов от замыканий между витками рассмотрены в [19]. При наличии выведенных параллельных ветвей обмотки статора наиболее просто выполняется односистемная поперечная дифференциальная токовая защита (рис. 12.5). Параллельные ветви соединяются по схеме звезды каждая, в цепь между нейтралью которых включается трансформатор тока *ТА*.

В нормальном режиме и при внешних коротких замыканиях токи обеих параллельных ветвей одинаковы, поэтому через *ТА* проходит только некоторый ток небаланса, содержащий высшие гармонические, кратные трем, обусловленные искажением кривой

ЭДС генератора. В токе небаланса содержится также ток нулевой последовательности основной частоты, вызванный неравенством ЭДС соответствующих параллельных ветвей каждой фазы. Для отстройки от токов высших гармонических реле KA подключается к трансформатору тока TA через частотный фильтр ZF , пропускающий только составляющую тока промышленной частоты.

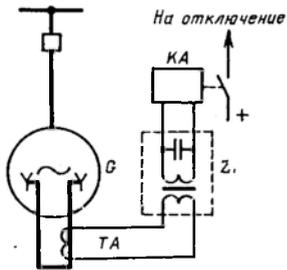


Рис. 12.5. Поперечная дифференциальная токовая защита генератора

При замыкании между витками одной фазы через трансформатор тока TA проходит уравнивающий ток, достаточный для срабатывания реле KA . Защита действует и при многофазных коротких замыканиях.

Для исключения срабатывания защиты при внешних коротких замыканиях ее ток срабатывания должен быть отстроен от максимального тока небаланса, расчет которого затруднителен. Поэтому на основании опытных данных рекомендуется принимать $I_{с.з} = (0,2 \dots 0,3) I_{г.ном.}$

Как правило, защита выполняется без выдержки времени. Однако применительно к турбогенераторам предусматривается возможность перевода ее на работу с выдержкой времени $t_{с.з} = 0,5 \dots 1,0$ с при появлении замыкания на землю в одной точке цепи возбуждения. Выдержка времени необходима для отстройки от случайных кратковременных замыканий во второй точке цепи возбуждения, когда поперечная дифференциальная защита может сработать вследствие несимметрии магнитного потока. Недостатком защиты является возможность отказа при малом числе замкнувшихся витков.

§ 12.4. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ ОТ НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

Защита от внешних коротких замыканий. Для выполнения этой защиты используют токовый принцип. Для повышения чувствительности защита снабжается дополнительным пусковым органом напряжения. На генераторах малой мощности допускается устанавливать минимальную защиту напряжения. Защита отключает генератор при коротком замыкании на смежных элементах в случае их неотключения по каким-либо причинам. Она резервирует также защиты генератора от многофазных замыканий в обмотке статора. В зависимости от мощности генератора защиту выполняют по одному из следующих вариантов: максимальная токовая защита; минимальная защита напряжения; максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения; токовая защита обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных повреждениях.

Максимальная токовая защита, как отмечалось выше (см. § 12.2), устанавливается на генераторах мощностью до 1,0 МВт. На одиночно работающих генераторах она является также защитой от многофазных к.з. в обмотке статора. Выбор её параметров рассмотрен в § 12.2.

Минимальная защита напряжения допускается на генераторах мощностью до 1,0 МВт, если невозможно использовать максимальную токовую защиту, например, из-за отсутствия трансформаторов тока со стороны нейтрали обмотки статора генератора. При этом она, как и максимальная токовая защита, предназначается и для защиты генератора при междуфазных к. з. в обмотке статора. Выбор параметров защиты рассмотрен в § 12.2.

Максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения. Так как максимальная токовая защита практически не может отличить токи внешних коротких замыканий от токов перегрузки, то для генераторов мощностью более 1,0 до 30

МВт рекомендуется максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения (рис. 12.6). Реле тока защиты $KA1—KA3$ соединены по схеме полной звезды. Комбинированный пусковой орган напряжения состоит из минимального реле напряжения KV , включенного на междуфазное напряжение, и максимального реле напряжения KVZ , которое присоединяется к фильтру напряжения обратной последовательности. Благодаря реле KVZ схема имеет повышенную чувствительность, не зависящую от группы соединения обмоток трансформатора, за которым происходит несимметричное к. з. Срабатывая при несимметричных к. з., оно разрывает цепь обмотки реле KV , обеспечивая его действие независимо от остаточного напряжения. Реле KVZ временно срабатывает и при трехфазных к. з., в связи с чем реле KV работает в условиях возврата, поэтому повышается чувствительность защиты и к симметричным к. з. Напряжение возврата минимального реле больше напряжения срабатывания в k_n раз, поэтому и чувствительность защиты повышается в k_n раз. Напряжение срабатывания реле KVZ должно быть отстроено от напряжения небаланса нормального режима. По данным опыта эксплуатации, рекомендуется принимать $U_{с.р.}=6$ В. Напряжение сраба-

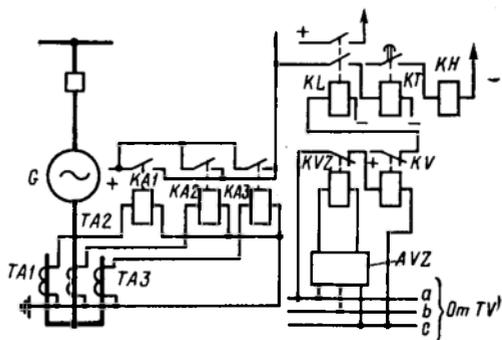


Рис. 12.6. Максимальная токовая защита от внешних коротких замыканий с комбинированным пусковым органом напряжения

тивания реле KV выбирают с учетом условий (12.2) и (12.3). При этом обеспечивается отстройка защиты от перегрузок и появляется возможность при выборе тока срабатывания по (12.1) принять коэффициент $k_{сзп}=1,0$. Защита при наличии секционного выключателя имеет две выдержки времени. С меньшей выдержкой $t^{III}_{с.з1}=t_{эл\ max}+\Delta t$ она действует на отключение секционного выключателя, а с большей выдержкой времени $t^{III}_{с.з2}=t^{III}_{с.з1}+\Delta t$ — на отключение генератора. Здесь $t_{эл\ max}$ — максимальная выдержка времени защиты элементов, подключенных к шинам генераторного напряжения.

В связи с наличием реле напряжения защита должна иметь требуемую чувствительность не только по току, но и по напряжению. Для реле тока $k_{чI}=I_{к\ min}/I^{III}_{с.з}$, для реле напряжения KVZ коэффициент $k_{чU}=U_{2\ к\ min}/U_{с.з}$ и для реле напряжения KV значение $k_{чU}=k_{в}U_{с.з}/U^{(3)}_{к\ max}$. Здесь $I_{к\ min}$, $U_{2\ к\ min}$ и $U^{(3)}_{к\ max}$ — соответственно минимальные ток к.з и напряжение обратной последовательности и максимальное междуфазное напряжение в месте установки защиты при повреждении в конце зоны резервирования. При этом должны обеспечиваться $k_{чI}\geq 1,2$; $k_{чU}\geq 1,2$.

Токковая защита обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных повреждениях. Достоинствами этой защиты являются: высокая чувствительность при несимметричных к.з., в том числе и за трансформатором с любой группой соединения обмоток; непосредственное реагирование на весьма опасный для генераторов ток обратной последовательности; обеспечение одним устройством защиты от внешних к.з. и защиты от перегрузки токами обратной последовательности. Она рекомендуется для генераторов мощностью $P_{г}>30$ МВт.

Основными элементами защиты являются фильтры-реле тока обратной последовательности (рис. 12.7), состоящие из фильтра тока обратной последовательности AZ и двух реле тока: $KAZ1$ — измерительного органа защиты от внешних коротких замыканий, $KAZ2$, осуществляющего сигнализацию о перегрузке. Для действия при трехфазных коротких замыканиях предусмотрены реле тока KA , включенное на фазный ток, и минимальное реле напряжений KV , включенное на междуфазное напряжение. Выдержку времени защиты создает реле времени KT .

Ток срабатывания реле $KAZ1$ выбирается исходя из следующих требований: реле не должно срабатывать при обрывах фаз в сети генераторного напряжения; по чувствительности защита должна быть согласована с защитами предыдущих элементов. Эти требования обычно выполняются при $I^{III}_{с.з1}\geq (0,5 \dots 0,6)I_{г.ном}$.

При выборе тока срабатывания реле $KAZ2$ исходят из условий отстройки от максимального допустимого тока несимметрии $I^{III}_{с.з2}\geq I_{2\ доп\ max}$, возврата после отключения внешнего несимметричного короткого замыкания, когда через защиту проходят ток

небаланса, обусловленный рабочим током генератора, и длительно-возможный ток несимметрии $I_2 \text{ доп}$:

$$I_{с.32}^{III} \geq k_{отс}^{III} (I_{нб} + I_{2\text{доп}}) / k_v.$$

В зависимости от типа и мощности генераторов расчетным для тока $I_{с.32}^{III}$ может оказаться любое условие. Выдержка времени защиты от внешних к.з. выбирается, как и максимальной токовой защиты с комбинированным пусковым органом напряжения, а выдержка времени защиты от перегрузки принимается несколько большей.

Защиты от перегрузок и от повышения напряжения.

Защита от симметричных перегрузок. Наибольшее распространение получила схема защиты, содержащая одно реле тока, включенное на ток фазы, и термически стойкое реле времени. Ток срабатывания защиты определяют по выражению (12.1), в котором принимают $k_{сзп}=1$, $k_{отс}=1,05$ при действии защиты на сигнал и $k_{отс}=1,1 \dots 1,2$ при ее действии на разгрузку или отключение (гидрогенераторов).

Выдержку времени принимают больше времени срабатывания защиты от внешних коротких замыканий. Известны и другие схемы защиты.

При возрастании тока в обмотке статора увеличивается и ток в обмотке ротора вследствие автоматического регулирования возбуждения генератора (см. § 12.8). Эта зависимость используется для выполнения защиты от симметричных перегрузок с зависимой и независимой характеристикой выдержки времени, реагирующей на ток ротора [19].

Защита от перегрузки токами обратной последовательности. Защита предусматривается на генераторах мощностью $P_r > 30$ МВт, причем на генераторах средней мощности она выполняется в виде рассмотренной выше сигнализации от несимметричных перегрузок (рис. 12.7, реле KAZ2). Более сложной получается защита мощных генераторов. Ее параметры выбираются из условия предотвращения повреждений ротора из-за перегрева при прохождении в обмотке статора токов I_2 обратной последовательности. Защита должна иметь зависимую от тока I_2 характеристику выдержки времени, соответствующую перегрузочной способности генератора. Выбор параметров защиты изложен в [96].

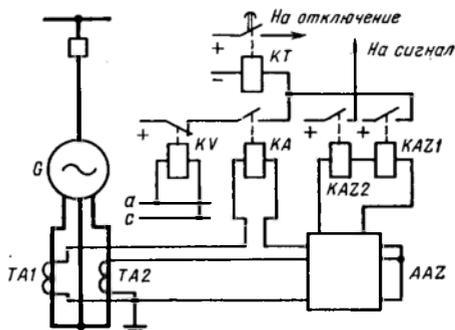
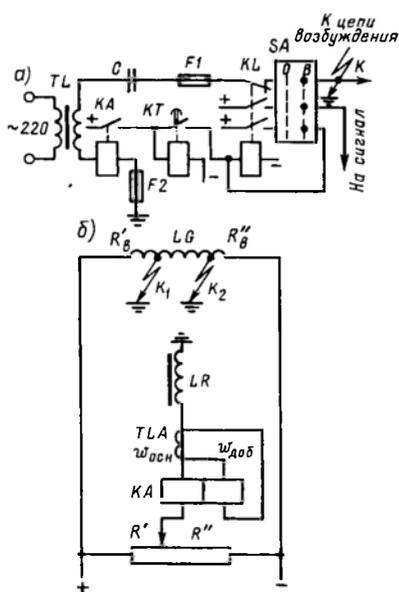


Рис. 12.7. Токвая защита обратной последовательности с приставкой в виде максимальной токовой защиты с пуском по напряжению

Максимальная защита напряжения. Как отмечалось, защита от повышения напряжения устанавливается только на гидрогенераторах. Измерительным органом защиты является максимальное реле напряжения, подключаемое к трансформатору напряжения генератора и имеющее уставку напряжения срабатывания $U_{с.р} = (1,5 \dots 1,7) U_{г.ном} / K_U$. Защита содержит реле времени с уставкой $t_{с.з} = 0,5$ с. Выдержка времени предотвращает действие защиты при кратковременных повышениях напряжения, устраняемых системой автоматического регулирования возбуждения. Защита действует на отключение генератора и автомата гашения поля (АГП).

§ 12.5. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРА НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В ЦЕПИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Защита от замыкания на землю в одной точке цепи возбуждения (рис. 12.8, а) предусматривается для установки на гидрогенераторах. В схеме применяется вспомогательный источник низкого напряжения переменного тока — трансформатор TL , подключенный к шинам напряжением 220 В собственных нужд электростанции.



Таким способом исключаются мертвые зоны защиты. Один вывод вторичной обмотки трансформатора TL связан с одним из полюсов цепи возбуждения через последовательно соединенные конденсатор C , предохранитель $F1$, контакты промежуточного реле KL и ключа управления SA , а второй вывод заземлен через обмотку реле тока KA и предохранитель $F2$. Заземление выполнено с помощью специальной щетки, имеющей электрический контакт с валом ротора генератора.

В нормальном режиме цепь вспомогательного источника переменного тока разомкнута. При появлении замыкания на землю (точка K) цепь переменного тока замыкается, реле KA срабатывает и защита действует на сигнал с выдержкой времени, необходимой для отстройки от кратковременных замыканий.

Рис. 12.8. Защита от замыканий на землю цепи возбуждения

При устойчивых замыканиях промежуточное реле KL самоудерживается и прекращает прохождение вспомогательного тока через место повреждения. Для снятия сигнала ключом SA разры-

вают цепь самоудерживания реле KL . Конденсатор C предотвращает прохождение постоянного тока через место повреждения, а предохранители защищают трансформатор TL при пробое конденсатора. Для выполнения защиты можно использовать также вспомогательный источник постоянного тока.

Защита от замыкания на землю во второй точке цепи возбуждения (рис. 12.8, б) является общей для всех турбогенераторов электростанции и присоединяется к тому из них, в цепи возбуждения которого возникает замыкание на землю в одной точке. Защита выполняется по схеме четырехплечего моста, в диагональ которого включается реле тока KA . Мост образуется сопротивлениями R'_B и R''_B левой и правой частей обмотки возбуждения (относительно точки первого замыкания K_1) и сопротивлениями R' и R'' переменного резистора, подключенного к кольцам ротора генератора. До появления второго замыкания мост балансируют, т. е. переменный резистор устанавливается в такое положение, при котором ток в диагонали моста отсутствует. Этому соответствует условие $R'_B R'' = R''_B R'$. После возникновения второго замыкания на землю (в точке K_2) баланс моста нарушается и защита срабатывает, если постоянный ток в диагонали достаточно большой.

При выполнении этой защиты учитывается то, что даже при наличии баланса моста через его диагональ может проходить переменный ток, обусловленный неравномерностью воздушного зазора в генераторе. Чтобы под действием указанного тока защита не сработала, его уменьшают, включая последовательно с основной обмоткой $\omega_{осн}$ реле тока KA реактор LR , имеющий для переменного тока большое сопротивление. Кроме того, в диагональ моста включают промежуточный трансформатор тока TLA , вторичный ток которого подводят к дополнительной обмотке $\omega_{доп}$ реле тока. Магнитодвижущая сила обмотки $\omega_{доп}$ направлена навстречу магнитодвижущей силе переменного тока обмотки $\omega_{осн}$, поэтому воздействие переменного тока на реле KA уменьшается.

Рассматриваемая защита отстраивается от тока небаланса, обусловленного неточной балансировкой моста и наличием переменного тока в реле. Защита имеет выдержку времени $t_{с.з} = 1,0 \dots 1,5$ с. Реле времени и выходное промежуточное реле подключаются, как и в предыдущей схеме (рис. 12.8, а), и поэтому они на рис. 12.8, б не показаны.

Основные недостатки этой защиты — наличие мертвой зоны (по обе стороны около точки первого замыкания) и невозможность использования в некоторых случаях (например, при первом замыкании у колец ротора).

§ 12.6. ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Для синхронных генераторов мощностью $P_r = 150$ кВт и менее защита может выполняться плавкими предохранителями. В соответствии с [3] защиту генераторов мощностью $P_r \leq 1$ МВт от всех видов повреждений и ненормальных режимов допускается осуществлять путем установки автоматических выключателей или максимальной токовой защиты при наличии коммутационного аппарата, например контактора. Защиту следует включать в выводы со стороны нейтрали, если это возможно. Она выполняется двухфазной. Для генераторов с глухозаземленной нейтралью защита должна предусматриваться в трехфазном исполнении или в виде двух комплектов: защиты от многофазных коротких замыканий и защиты от однофазных коротких замыканий на землю.

В ряде случаев, когда появляются повышенные требования к надежности и селективности действия защиты при внутренних повреждениях на генераторах, работающих параллельно с другими генераторами или электрической системой, рекомендуется дополнительно устанавливать токовую отсечку без выдержки времени со стороны выводов к сборным шинам. При отключении генератора защита должна также действовать на устройство АГП, если оно имеется. Для генераторов мощностью $P_r \leq 1,0$ МВт допускается устройства АГП не устанавливать.

Защита от многофазных коротких замыканий. Защита плавкими предохранителями. При выборе плавких предохранителей $F1$ для защиты генераторов (рис. 12.9) используют условия (11.1) и (11.2). При этом: максимальный ток $I_{k \max}$ определяют по наибольшему из токов $I_{k.g}(K_1)$ и $I_{k.c}(K_2)$; в качестве тока $I_{\text{раб max}}$ принимают номинальный ток генератора $I_{г.ном}$; при выборе коэффициента отстройки $k_{отс}$ меньшее значение принимают для одиночно работающего генератора и большее для генераторов, работающих параллельно с энергосистемой или другими генераторами. Выбранные предохранители должны удовлетворять требованиям селективности и чувствительности (см. § 11.3).

Защита автоматическими выключателями. Комбинированные расцепители автоматических выключателей защищают генератор от коротких замыканий и перегрузок. При наличии минимального расцепителя напряжения можно выполнить защиту от понижения напряжения. Вспомогательный контакт автоматического выключателя используется для воздействия на устройство АГП. Выбирают автоматические выключатели по правилам, изложенным в § 11.5 и 11.6.

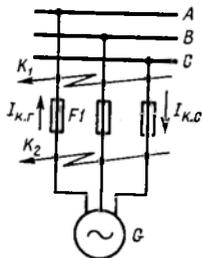


Рис. 12.9. Расчетные точки повреждения при выборе предохранителей для защиты генератора

Необходимо заметить, что защитные характеристики расцепителей рассмотренных в § 11.4 автоматических выключателей мало подходят для защиты генераторов от перегрузки в связи с большими временами срабатывания при опасных перегрузках. Защиту приходится ограничивать токовой отсечкой, действующей только при коротких замыканиях.

Максимальная токовая защита выполняется так же, как и у генераторов напряжением выше 1 кВ (см. § 12.2). В случае недостаточной чувствительности в схему защиты вводят пусковой орган, состоящий из трех минимальных реле напряжения или комбинированный пусковой орган напряжения. Выбор параметров защиты рассмотрен в § 12.2 и 12.4. Чувствительность максимальной токовой защиты можно также повысить, если использовать реле тока РТ-80,

при этом ток срабатывания можно выбрать без учета $k_{сзн}$, а отстройку от самозапуска осуществить по времени. Если генератор работает в системе с заземленной нейтралью, то при определении чувствительности следует также рассмотреть однофазное короткое замыкание при отсутствии защиты от этого вида повреждения.

Токовая отсечка без выдержки времени выполняется, как и отсечка генератора напряжением выше 1 кВ, в соответствии с условиями, изложенными выше (см. § 12.2).

Токовая отсечка без выдержки времени выполняется, как и отсечка генератора напряжением выше 1 кВ, в соответствии с условиями, изложенными выше (см. § 12.2).

Защита от коротких замыканий на землю. При двухфазном выполнении защиты от многофазных к.з. в обмотке статора генератора, работающего с заземленной нейтралью, дополнительно предусматривается защита нулевой последовательности — максимальная токовая или продольная дифференциальная. Схемы таких защит показаны на рис. 12.10 [97].

В схеме максимальной токовой защиты нулевой последовательности (рис. 12.10, а) реле тока КА включено через трансформатор тока ТА в нулевой провод генератора. При коротких замыканиях на землю в обмотке статора и в сети генераторного напряжения в этом проводе проходит утроенный ток нулевой последовательности. Параметры защиты выбирают так же, как и для аналогичной защиты сетей (см. § 5.11).

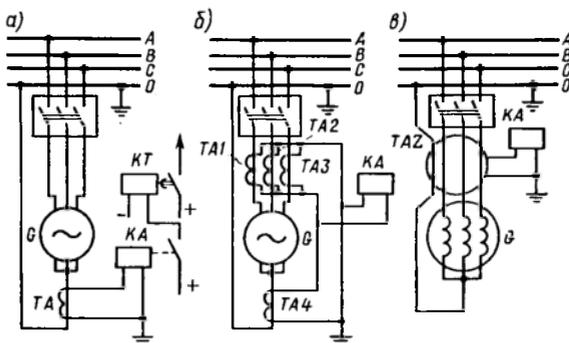


Рис. 12.10. Защиты нулевой последовательности синхронных генераторов с заземленной нейтралью

Продольная дифференциальная защита нулевой последовательности (рис. 12.10, б) выполнена по схеме с циркулирующими токами. Сравнивается ток трехтрансформаторного фильтра тока нулевой последовательности ($TA1—TA3$) с вторичным током трансформатора тока $TA4$ в нулевом проводе. Для исключения срабатывания защиты при обрывах в цепях обмоток трансформаторов фильтра тока нулевой последовательности необходимо выполнить условие

$$I_{с.з} = k_{отс} I_{г.ном}, \quad (12.6)$$

где $k_{отс} = 1,3 \dots 1,4$.

В схеме дифференциальной защиты (рис. 12.10, в) применен один трансформатор тока нулевой последовательности TAZ . Ток в реле KA пропорционален разности магнитного потока, создаваемого токами фазных проводов, и потока, создаваемого током нулевого провода. При внешних коротких замыканиях на землю эта разность близка к нулю и ток в реле недостаточен для срабатывания защиты. В случае повреждения на землю в зоне действия защиты магнитные потоки суммируются, ток в реле превышает ток срабатывания и защита отключает генератор. Для выбора тока срабатывания защиты используется условие (12.6), в котором принимается $k_{отс} = 0,2 \dots 0,4$.

§ 12.7. СИНХРОНИЗАЦИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

Способы синхронизации. Под синхронизацией понимают процесс включения синхронной машины на параллельную работу с другой синхронной машиной или с энергосистемой. Процесс включения может быть полностью автоматизирован. Все операции при этом выполняются без вмешательства персонала.

Автоматическая синхронизация применяется прежде всего на гидроэлектростанциях. Если при синхронизации часть операций по включению генератора выполняется человеком, то такая синхронизация называется полуавтоматической. В ряде случаев допускается осуществлять синхронизацию вручную без использования устройств автоматики.

Существует два способа включения синхронных генераторов на параллельную работу: самосинхронизация и точная синхронизация. При этом, несмотря на различие условий, в которых находится генератор, и тот и другой способы должны обеспечить включение генератора при допустимых значениях уравнивающего тока и мощности и вхождение включенного генератора в синхронизм.

Самосинхронизация. Сущность ее заключается в том, что во время включения генератора при скорости, близкой к синхронной, автомат гашения поля (АГП) остается отключенным и обмотка

ротора генератора оказывается замкнутой на разрядный резистор и отсоединенной от возбудителя. Таким образом, генератор включается в сеть невозбужденным ($E_q=0$). После включения выключателя генератора подается сигнал на включение АГП, который подключает обмотку ротора к возбудителю. Генератор возбуждается и втягивается в синхронизм. Для энергосистемы такое включение эквивалентно трехфазному короткому замыканию за сопротивлением генератора, поэтому действующее значение периодической составляющей переходного уравнивающего тока

$$I'_{yp} = U_c / (X'_d + X_c), \quad (12.7)$$

где X_c и U_c — приведенные к генераторному напряжению соответственно сопротивление и напряжение системы.

Наиболее тяжелым случаем является включение генератора на шины неограниченной мощности ($X_c=0$). При этом ток I'_{yp} может достигать значений тока трехфазного короткого замыкания возбужденного генератора при повреждении на его выводах ($I'_{к'} = E'_q / X'_d$). Во всех других случаях $I'_{yp} < I'_{к'}$, поэтому при самосинхронизации генератор находится в более легких условиях, чем при коротких замыканиях. При самосинхронизации понижается напряжение в системе. Минимальное напряжение получается на выводах генератора $U_r = U_c X'_d / (X'_d + X_c)$. Однако работа потребителей при этом, как правило, не нарушается (напряжение восстанавливается через 2—3 с). При самосинхронизации на ротор действует ряд вращающих моментов. Процесс вхождения в синхронизм зависит от их соотношения [98].

Самосинхронизацию рекомендуется применять как основной способ включения в тех случаях, когда уравнивающий ток $I'_{yp} < < 3,5 I_{г.ном}$. При этом на гидрогенераторах предусматривается автоматическая, а на турбогенераторах — полуавтоматическая самосинхронизация. Нужно отметить, что в ряде случаев при допустимой кратности уравнивающего тока применяют способ автоматической или полуавтоматической точной синхронизации. Это относится, например, к генераторам с непосредственным охлаждением обмоток. В аварийных ситуациях самосинхронизацию допускается применять независимо от кратности уравнивающего тока и способа охлаждения генератора. В схеме самосинхронизации применяют реле разности частот ИРЧ-01А. Действие реле основано на индукционном принципе. Оно выполнено на четырехполюсной магнитной системе.

На рис. 12.11 дана упрощенная схема полуавтоматической самосинхронизации с реле разности частот KF типа ИРЧ-0,1А.

Процесс самосинхронизации начинается с включения ключа синхронизации SA . При этом контактами $SA.1—SA.3$ на схему подается оперативный ток и обмотка напряжения $KF.1$ реле KF контактом $SA.4$ подключается к трансформатору напряжения $TV1$ шин электростанции (рис. 12.11, а), Обмотка $KF.2$ (рис.

12.11, б) контактом SA.5 подключается к трансформатору напряжения TV2 генератора спустя время $t_{c.p}=1 \dots 2$ с (реле времени KT), если выключатель и АГП генератора находятся в отключенном состоянии (вспомогательные контакты Q.2 и ASV замкнуты) и на выводах генератора отсутствует напряжение (контакт KV минимального реле напряжения KV замкнут). К обмотке подводится небольшое остаточное напряжение генератора, составляющее около $U_{г.ост}=0,2$ В, так как генератор включается в сеть невозбужденным.

Магнитные потоки, создаваемые токами в обмотках реле, периодически сменяются по фазе на угол $0 \leq \delta \leq 2\pi$ со скоростью, пропорциональной разности частот синхронизируемых напряжений. При этом подвижная система реле со-

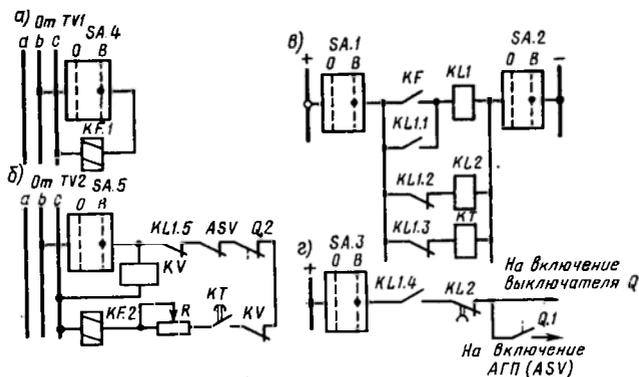


Рис. 12.11. Упрощенная схема устройства полуавтоматической самосинхронизации

вершает колебательные движения. Чем меньше разность частот, тем больше амплитуда колебаний. При допустимой по условиям самосинхронизации разности частот реле одновременно замыкает контакты KF в цепи обмотки промежуточного реле KL1 (рис. 12.11, б). Оно срабатывает и контактом KL1.1 самодерживается, а контактом KL1.4 подает воздействие на включение выключателя (рис. 12.11, в). После этого в связи с замыканием вспомогательного контакта выключателя Q.1 включается АГП. Реле KL2, управляемое замыкающим контактом KL1.2 реле KL1, обеспечивает однократность действия. Реле имеет некоторое замедление при возврате, что необходимо для надежного включения выключателя и АГП.

После завершения процесса самосинхронизации обмотка KF.2 реле разности частот отключается от трансформатора напряжения TV2 размыкающими контактами KV, KL1.5 и вспомогательными контактами ASV и Q.2 (рис. 12.11, б). Это необходимо для того, чтобы исключить повреждение обмотки, не рассчитанной на номинальное вторичное напряжение трансформатора TV2. Для возврата реле KL1 и других реле ключ SA переводится в отключенное положение.

Точная синхронизация. При точной синхронизации генератор включается в сеть возбужденным, поэтому уравнивающий ток в момент включения определяется при прочих равных условиях значением напряжения биения U_s , которое, как указывалось, равно геометрической разности ЭДС (напряжения) синхронизируемого генератора $\underline{U}_Г$ и системы \underline{U}_c .

На рис. 12.12, а дана векторная диаграмма для случая $U_r = U_c = U$, из которой следует, что $U_s = 2U \sin \delta / 2$. При этом уравнивающий ток $I_{ур} = [2U / (X_r + X_c)] \sin \delta / 2$. Максимальное значение

он приобретает в момент включения генератора ($U_r = E_q''$ и $X_r = X_d''$) на шины системы неограниченной мощности ($X_c = 0$) при угле $\delta = \pi$. В этом случае уравнивающий ток $I_{ур}''$ превышает в два раза сверхпереходный ток трехфазного короткого замыкания генератора I_k'' .

Очевидно, что устройство точной синхронизации должно обеспечивать включение при уравнительном токе $I_{ур} = 0$. Для выполнения этого условия необходимо обеспечить: равенство напряжений включаемого генератора U_r и системы U_c ; совпадение по фазе указанных напряжений ($\delta = 0$); равенство угловых скоростей включаемого генератора ω_r и системы ω_c . Если бы выключатель включался мгновенно ($t_{в.в.} = 0$), то в процессе точной синхронизации достаточно (для обеспечения $I_{ур} = 0$) было бы выполнить два первых требования и сигнал на включение выключателя подать при $U_s = 0$. В действительности $t_{в.в.} \neq 0$, поэтому выключатель необходимо включать с некоторым опережением. Сигнал на включение можно подавать либо с постоянным углом опережения $\delta_{оп}$, либо с постоянным временем опережения $t_{оп}$, равным времени включения выключателя $t_{в.в.}$. В соответствии с этим различают синхронизаторы с постоянным углом опережения и синхронизаторы с постоянным временем опережения.

На рис. 12.12, б показан характер изменения $U_s = f(t)$ для двух значений угловой скорости скольжения $\omega_s = \omega_r - \omega_c$. Так как угол $\delta = \omega_s t$, то при $\delta = \delta_{оп}$ каждому значению ω_s соответствует определенное время, в частности $t_{оп1}$ и $t_{оп2}$. В общем случае $t_{оп}$ отличается от $t_{в.в.}$, поэтому действие синхронизатора с постоянным углом опережения может сопровождаться значительным уравнительным током из-за включения выключателя не в момент оптимума ($U_s = 0$), что является принципиальным недостатком синхронизатора с постоянным углом опережения. В настоящее время такие синхронизаторы уже не применяются.

Синхронизатор с постоянным временем опережения не имеет указанного недостатка. Если принять $t_{оп} = t_{в.в.}$, то выключатель должен при любых значениях ω_s включиться в момент оптимума. Однако в действительности происходят отклонения из-за разброса времени $t_{в.в.}$ и погрешности синхронизатора. При неравенстве абсолютных значений синхронизируемых напряжений форма огибающей напряжения биения искажается. Во всех случаях предполагается, что значение угловой скорости скольжения ω_s в течение времени опережения $t_{оп}$ остается постоянным. В действительности имеет место некоторое угловое ускорение. В синхронизаторах, исполь-

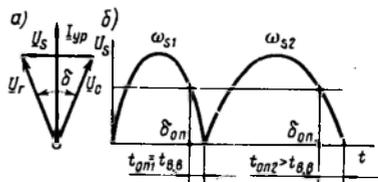


Рис. 12.12. Векторная диаграмма (а) и изменение напряжения биения (б) при точной синхронизации

зующих напряжение биения в качестве воздействующей величины, например в синхронизаторе АСТ-4, эти обстоятельства не учитываются, что также вызывает погрешности в их работе. Таким образом, недостатки этих синхронизаторов обусловлены тем, что измерение угла δ между векторами синхронизируемых напряжений и угловой скорости скольжения ω_s производится косвенным способом, через напряжение биения. В связи с этим в современных синхронизаторах с постоянным временем опережения напряжение биения не используется. Такими устройствами являются синхронизаторы СА-1 и УТСЗ.

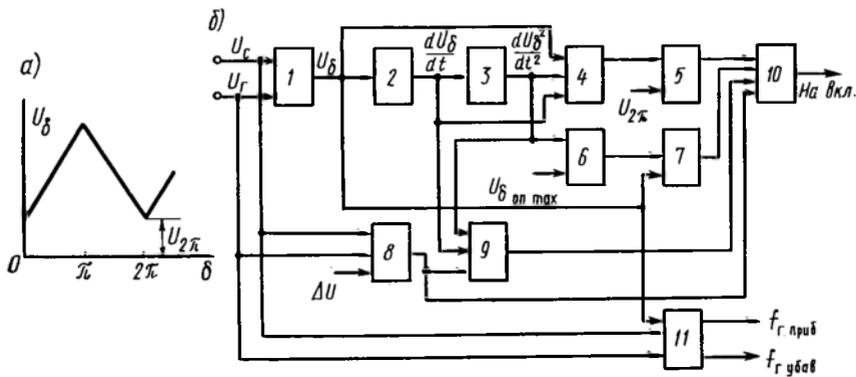


Рис. 12.13. Синхронизатор СА-1: а — преобразование угла δ в напряжение U_δ ; б — функциональная схема

Синхронизатор СА-1 выпускается на основе разработок Московского энергетического института [77, 99, 100]. Принцип действия синхронизатора заключается в непосредственном измерении угла δ после предварительного преобразования его в напряжение постоянного тока U_δ (рис. 12.13, а). Причем угол опережения $\delta_{он}$, соответствующий заданному времени опережения $t_{он}$, выбирается с учетом скорости изменения угла δ $\left(\frac{d\delta}{dt} t_{он}\right)$ и его ускорения

$$\left(\frac{d^2\delta}{dt^2} \frac{t_{он}^2}{2}\right), \text{ т. е. } \delta_{он} = \frac{d\delta}{dt} t_{он} + \frac{d^2\delta}{dt^2} \frac{t_{он}^2}{2}.$$

В зависимости от знака скольжения синхронизатор разрешает включение при выполнении условий $\delta + \delta_{он} = 2\pi$ или $\delta + \delta_{он} = 0$. Так как зависимость между δ и U_δ имеет линейный характер, то условие срабатывания синхронизатора представим в виде

$$U_\delta + \frac{dU_\delta}{dt} t_{он} + \frac{d^2U_\delta}{dt^2} \frac{t_{он}^2}{2} = U_{2\pi}, \quad (12.8)$$

где $U_{2\pi}$ — значение U_{δ} при угле $2\pi(0)$.

Упрощенная функциональная схема синхронизатора показана на рис. 12.13, б.

Измерительный преобразователь 1 осуществляет линейное преобразование угла δ в напряжение постоянного тока U_{δ} . Дифференцирующие усилители 2 и 3 дважды дифференцируют напряжение U_{δ} , а сумматор 4 реализует левую часть выражения (12.8). Полученное напряжение поступает на вход компаратора 5, который сравнивает его с напряжением $U_{2\pi}$ и через логическую часть устройства 10 разрешает включение, если выполняется условие (12.8). Дифференцирующие усилители 2 и 3, сумматор 4 и компаратор 5 составляют блок времени опережения. Синхронизатор позволяет устанавливать $t_{оп} = 0,1 \dots 1,0$ с. Синхронизатор содержит устройство запрета по максимально допустимому углу опережения, состоящее из сумматора 6 и компаратора 7. При определении значения максимально допустимого угла опережения $\delta_{оп\ max}$, соответствующего максимально допустимой скорости скольжения ω_{\max} ($\delta_{оп\ max} = \omega_{\max} t_{оп}$), необходимо учитывать действительное ускорение в момент замыкания контактов выключателя. Угол $\delta_{оп\ max}$ устанавливается на сумматоре 6 в виде расчетного напряжения $U_{\delta\ op\ max}$, а поправка на ускорение вводится автоматически в сумматор в виде напряжения с выхода дифференцирующего усилителя 3. Полученное напряжение U_{Σ} сравнивается компаратором 7 с напряжением U_{δ} . Включение запрещается при $U_{\Sigma} > U_{\delta}$.

Синхронизатор разрешает включение при максимально допустимых углах опережения, не превышающих 120° . Включение также запрещается, если разность абсолютных значений синхронизируемых напряжений превышает допустимое значение ΔU . Для этой цели в устройстве предусмотрен блок запрета 8. Предельная допустимая разность амплитуд синхронизируемых напряжений равна 15 В (номинальные значения напряжений равны 100 В). Узел блокировки 9 предотвращает неправильные срабатывания синхронизатора при переходных процессах в его элементах, возникающих в момент подачи или снятия синхронизируемых напряжений. Синхронизатор содержит уравниватель частот 11, действующий на систему регулирования частоты вращения генератора. Он разрешает включение, если частота сети f_c и частота генератора f_r отличаются не более чем на 1 Гц. При угловой скорости скольжения, близкой к нулю, синхронизатор может отказать в действии. Для исключения этого уравниватель частот выполнен так, что он подгоняет ω_s не к нулю, а к некоторому минимальному значению.

Синхронизатор СА-1 не содержит устройства, уравнивающего синхронизируемые напряжения. Эта операция выполняется вручную в процессе синхронизации.

Синхронизатор УТСЗ, разработанный в ВНИИ «Электропривод» [101], является устройством точной синхронизации, обеспечивающим автоматизацию всего процесса включения синхронного генератора. Основными элементами синхронизатора являются (рис. 12.14): узел подгонки напряже-

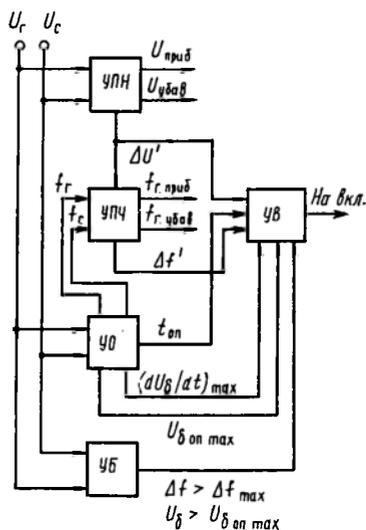


Рис. 12.14. Функциональная схема синхронизатора УТСЗ

ния (УПН); узел подгонки частоты (УПЧ); узел опережения (УО); узел включения (УВ) и узел блокировки (УБ). Рассмотрим функциональные схемы и работу этих узлов.

Узел опережения (УО) формирует сигнал на включение выключателя синхронизируемого генератора с заданным временем опережения $t_{оп}$ без использования напряжения биения. Это устройство, как и синхронизатор СА-1, осуществляет непосредственное измерение угла δ . Упрощенная функциональная схема УО и графики его работы показаны на рис. 12.15, а.

Напряжения сети U_c и генератора U_r поступают на входы инвертирующих операционных усилителей 1 и 1' и преобразуются ими в напряжения U_{1c} и U_{1r} , которые, в свою очередь, с помощью операционных усилителей 2 и 2' преобразу-

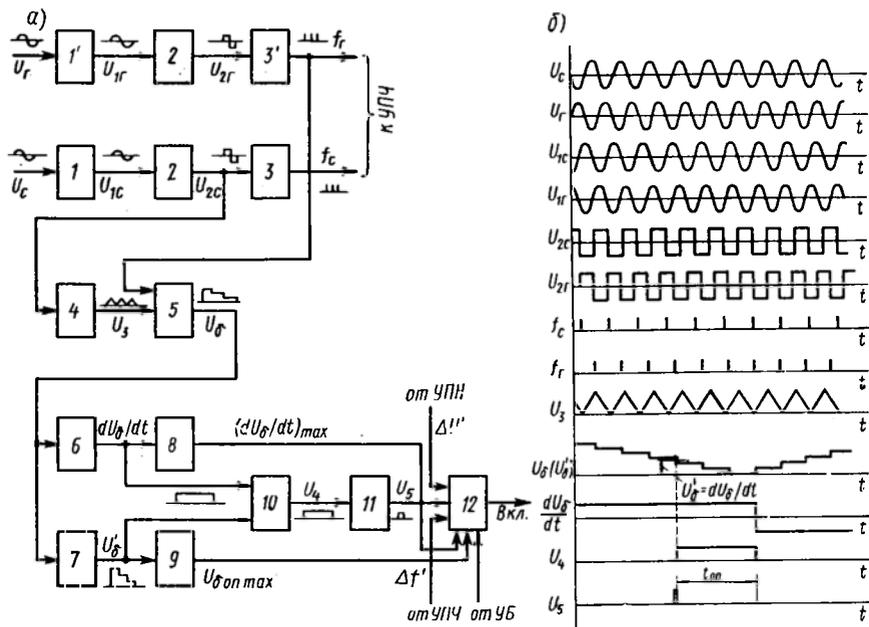


Рис. 12.15. Функциональная схема узла опережения (а) и графики его работы (б)

зуются в прямоугольные напряжения U_{2c} и U_{2r} , следующие с частотой сети f_c и частотой генератора f_r . Элементы 3 и 3', содержащие дифференцирующие конденсаторы и инверторы (логические элементы НЕ), формируют из напряжений U_{2c} и U_{2r} узкие импульсы с частотой сети f_c и с частотой генератора f_r . Напряжение U_{2c} поступает также на вход инвертирующего операционного усилителя 4. На выходе усилителя формируется пилообразное напряжение U_3 . Это напряжение подается на вход элемента 5 (фазового детектора), который управляется импульсами f_r . При поступлении очередного импульса на выходе элемента 5 появляется постоянное напряжение U_δ , значение которого пропорционально углу δ между синхронизируемыми напряжениями U_c и U_r . Таким образом осуществляется преобразование угла δ в постоянное напряжение U_δ .

На рис. 12.15, б рассмотрен случай, когда частота генератора выше частоты сети, поэтому фаза импульсов f_r равномерно смещается во времени относительно фазы импульсов f_c и пилообразного напряжения U_3 . В результате напряжение U_8 приобретает ступенчатую форму. Оно максимально при $\delta = \pi$ и равно нулю при $\delta = 0$. Это напряжение поступает на вход дифференцирующего усилителя 6 и неинвертирующего усилителя 7. Напряжение dU_8/dt на выходе усилителя 6 пропорционально угловой скорости скольжения. Усилитель 7 имеет в цепи обратной связи три резисторных делителя, с помощью которых можно изменять значения напряжения U'_8 на его выходе. Сигналы с выхода усилителей 6 и 7, пропорциональные угловой скорости скольжения и углу δ , поступают на вход компаратора 10, на выходе которого формируется сигнал U_4 . Его передний фронт возникает при условии $U'_8 = dU_8/dt$, а задний фронт совпадает с моментом времени, когда $\delta = 0$, поэтому продолжительность сигнала U_4 равна времени опережения $t_{оп}$. Таким образом, в отличие от синхронизатора СА-1 здесь при определении $t_{оп}$ угловое ускорение (d^2U_8/dt^2) не учитывается, что делает замер менее точным.

Момент возникновения переднего фронта сигнала U_4 изменяется с изменением уровня U'_8 на операционном усилителе 7. При этом изменяется продолжительность $t_{оп}$. Устройство позволяет устанавливать три значения времени опережения в диапазоне от 0,1 до 1,0 с. Элемент 11 формирует из переднего фронта сигнала U_4 узкий импульс U_5 , поступающий на вход узла включения 12. Для предотвращения включения генератора в сеть при больших угловых скоростях скольжения и значительных углах δ сигнал на включение с выхода УВ блокируется при $dU_8/dt > (dU_8/dt)_{max}$ и $U'_8 > U_{8\text{оп max}}$. Эти условия обеспечиваются элементами 8 и 9.

Узел подгонки напряжения (УПН) формирует сигнал, воздействующий на систему возбуждения генератора с целью подгонки его напряжения к заданной точности к напряжению сети. Упрощенная функциональная схема и графики работы устройства показаны на рис. 12.16.

Выпрямленные с противоположной полярностью напряжения U_r и U_c поступают на вход сумматора 1. В результате сложения разнополярных выпрямленных напряжений на выходе сумматора формируется постоянное напряжение ΔU , пропорциональное разности U_r и U_c . При $U_r > U_c$ напряжение ΔU имеет положительный знак, а при $U_r < U_c$ — отрицательный. Напряжение $\pm \Delta U$ подается на входы двух операционных усилителей. Один из них (2) включен как

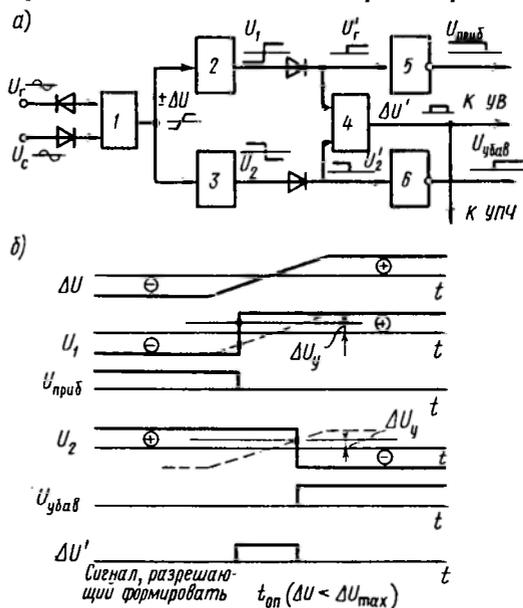


Рис. 12.16. Функциональная схема узла подгонки напряжения (а) и графики его работы (б)

повторитель, а другой (3) — как компаратор. Операционные усилители переключаются в зависимости от значения и знака ΔU . При отрицательном ΔU напряжение U_1 на выходе операционного усилителя 2 имеет отрицательный знак, а напряжение U_2 на выходе операционного усилителя 3 — положительный. В этом случае сигнал на входе элемента 5 отсутствует, а на входе элемента 6 имеется. Элементы 5 и 6 выполняют логическую операцию НЕ, поэтому сигнал $U_{\text{приб}}$ появляется только на выходе элемента 5 и устройство действует на систему возбуждения генератора, увеличивая его напряжение и тем самым уменьшая ΔU . При достижении ΔU значения уставки ΔU_y операционный усилитель 2 переключается, снимает сигнал $U_{\text{приб}}$ и остается в таком состоянии при дальнейшем уменьшении отрицательного значения ΔU и при любых положительных его значениях. В процессе подгонки напряжение U_r может превысить напряжение U_c . В этом случае ΔU становится положительным. При достижении им значения ΔU_y компаратор 3 переключается, на его выходе появляется отрицательное напряжение, а на выходе элемента 6 — сигнал $U_{\text{убав}}$. Устройство действует в сторону снижения напряжения генератора.

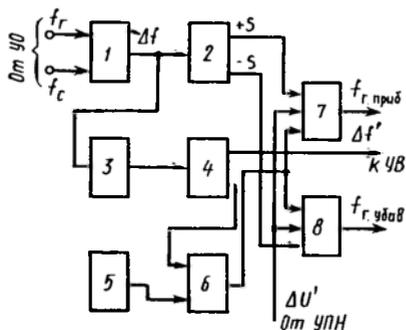


Рис. 12.17. Функциональная схема узла подгонки частоты синхронизатора УТСЗ

В устройстве УТСЗ значение ΔU_{max} регулируется в диапазоне $(0,02 \dots 0,1) U_c$.

Узел подгонки частоты (УПЧ) формирует сигналы, воздействующие на регулятор числа оборотов турбины, и подгоняет частоту напряжения генератора с заданной точностью к частоте и фазе напряжения сети. Упрощенная функциональная схема УПЧ показана на рис. 12.17.

Узкие импульсы, следующие с частотой генератора f_r и частотой сети f_c от УО (рис. 12.17), поступают на вход элемента 1, выделяющего разность частот $\Delta f = (f_c - f_r)$. Этот сигнал подается на вход элемента 2, на одном из выходов которого формируется сигнал $+S$ при положительном $\Delta f (f_c > f_r)$, а на другом — сигнал $-S$ при отрицательном $\Delta f (f_c < f_r)$. Эти сигналы через логические элементы 7 и 8 воздействуют на регулятор числа оборотов турбины так, что при $f_c > f_r$ на выходе элемента 7 появляется сигнал $f_{\text{приб}}$, а при $f_c < f_r$ элемент 8 формирует сигнал $f_{\text{убав}}$. Длительность сигналов $f_{\text{приб}}$ и $f_{\text{убав}}$ определяется генераторами импульсов 3 и 5, выполненных на операционных усилителях. На вход генератора 3 поступают сигналы с частотой скольжения Δf . Если $\Delta f = 0$, то период следования собственных импульсов генератора 3 составляет 14 с. Генератор 3 совместно с реле частоты 4 формирует сигнал, поступающий на вход логического элемента 6. На другой его вход подаются импульсы от автономного генератора импульсов 5.

Работа логического элемента 6 организована так, что при $|\Delta f| > f_{\max}$ к элементам 7 и 8 проходят сигналы от автономного генератора 5. Длительность импульсов и пауз сигнала являются регулируемыми величинами и выбираются из условия снижения Δf до значения Δf_{\max} , где Δf_{\max} — заданная максимальная разность частот, при которой допускается включение генератора в сеть, не более 0,2 Гц. При $\Delta f \leq \Delta f_{\max}$ работой логических элементов 7 и 8 управляют генератор 3 и реле частоты 4 импульсами с частотой Δf . При частоте, близкой к нулю, период скольжения становится чрезмерно большим и синхронизатор может отказать в действии или затянуть процесс синхронизации. Для предотвращения этого работа генератора 3 организована так, что при $\Delta f \approx 0$ импульсы управления следуют с собственной частотой генератора 3. Узел подгонки частоты выполнен так, что процесс подгонки частоты генератора начинается только после подгонки напряжения при поступлении сигнала $\Delta U'$ от УПН. Наряду с подгонкой частоты УПЧ формирует сигнал $\Delta f'$, разрешающий работу узла включения.

Узел включения (УВ) (элемент 12 на рис. 12.15) является устройством, контролирующим выполнение условий $\Delta U < \Delta U_{\max}$, $\Delta f < \Delta f_{\max}$, $U_{\delta} < U_{\delta \text{оп макс}} (\delta < \delta_{\text{оп макс}})$, $dU_{\delta}/dt < (dU_{\delta}/dt)_{\max}$ и наличие импульса U_5 на включение выключателя от УО.

Узел блокировки (УБ) осуществляет дополнительную защиту от несинхронных включений при $\Delta f > \Delta f_{\max}$ и $U_{\delta} > U_{\delta \text{оп макс}}$. Он формирует сигнал, блокирующий прохождение сигнала U_5 на включение с выхода узла опережения.

§ 12.8. СИСТЕМЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И НАЗНАЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Основным назначением устройств автоматического регулирования возбуждения (УАРВ) синхронных генераторов является повышение динамической устойчивости систем электроснабжения путем быстрого и значительного увеличения возбуждения генераторов в аварийных режимах. При этом также облегчается самозапуск электродвигателей и обеспечивается более четкая работа релейной защиты за счет уменьшения затухания тока к.з.

В нормальном режиме работы УАРВ поддерживает заданное напряжение на шинах электростанции или в иной точке электросистемы и обеспечивает наиболее выгодное распределение реактивной мощности между параллельно работающими генераторами и электростанциями. Сущность АРВ состоит в том, что автоматический регулятор воспринимает изменения напряжения или других электрических величин (например, тока) и преобразует их в изменения тока возбуждения генератора. Устройства АРВ, реагирующие на знак и значение отклонения входных параметров, называются *автоматическими регуляторами пропорционального действия* в отличие от *регуляторов сильного действия*, реагирующих не только на знак и значение, но и на скорость изменения электрических величин. Обычно используются отклонение напряжения генератора ΔU_r и скорость изменения напряжения dU_r/dt , откло-

нение частоты Δf и скорость изменения частоты df/dt , а также скорость изменения тока возбуждения генератора dl_b/dt . В связи с этим регулятор сильного действия оказывается довольно сложным устройством.

Схема регулятора определяется системой возбуждения, основными элементами которой являются обмотка возбуждения и источник постоянного напряжения для ее питания — возбудитель. Обмотка возбуждения расположена на подвижной части синхронной машины — роторе — и вращается вместе с ним, поэтому подключение обмотки к возбудителю и выполнение самого возбудителя связаны с рядом трудностей. Трудности эти возрастают по мере увеличения мощности синхронной машины. В связи с этим существуют различные системы возбуждения, которые классифицируются по виду применяемого возбудителя. Основными из них являются *электромашиная* и *тиристорная* системы возбуждения. В *электромашиную систему* входят:

система возбуждения с генератором постоянного тока;

система возбуждения с генератором переменного тока повышенной частоты с неуправляемым полупроводниковым выпрямителем — диодно-электромашиная система [77, 102]; в ряде источников [57, 103] она называется системой высокочастотного возбуждения;

бесщеточная система возбуждения с генератором переменного тока повышенной частоты.

Электромашиные возбудители обычно располагают непосредственно на валу синхронного генератора. Иногда под электромашиной системой понимают только систему возбуждения с генератором постоянного тока. Краткие сведения о системах возбуждения даются ниже.

Электромашиная система возбуждения с генератором постоянного тока (рис. 12.18). В качестве возбудителя используется генератор постоянного тока GE с обмоткой возбуждения LE , включенной через реостат $R_{св}$ параллельно обмотке якоря по схеме самовозбуждения. При изменении тока в обмотке LE изменяется напряжение возбудителя, а следовательно, изменяется и ток в обмотке возбуждения LG синхронного генератора G , которая подключается к возбудителю с помощью колец и щеток. Ток в обмотке LE можно изменять путем изменения сопротивления реостата $R_{св}$ и за счет дополнительного тока, посылаемого устройством АРВ. Возбудитель обычно наряду с основной обмоткой возбуждения LE имеет дополнительные обмотки. В таком случае выход УАРВ подключается к этим обмоткам. В электромашиной системе возбуждения наряду с возбудителем может быть подвозбудитель. При этом основная обмотка возбуждения LE возбудителя подключается к подвозбудителю. Системы возбуждения с генераторами постоянного тока применяются на синхронных генераторах мощностью до 100 МВт. Эти ограничения связаны с трудностями изготовления электромашиного возбудителя постоянного тока требуемой мощности, которая составляет 0,4—0,6% и более от мощности турбогенератора [103]. Для быстроходных машин (турбогенераторов) эти трудности обусловлены невозможностью выполнить возбудитель с надежно работающим коллектором.

Диодно-электромашиная система возбуждения (рис. 12.19). Она является типовой для турбогенераторов мощностью 200 и 300 МВт. Возбудителем GE в этой системе является индукторный генератор переменного тока повышенной

частоты. Силовая обмотка и обмотки возбуждения $LE1—LE3$ машины расположены на статоре, а ротор выполнен в виде десятизубцового колеса (сердечника). При наличии тока в обмотках возбуждения и вращении ротора создается пульсирующее магнитное поле, индуцирующее в силовой обмотке возбудителя ЭДС частотой 500 Гц. Обмотка подключена к силовым выпрямителям $VS1$ и $VS2$. Выпрямленное напряжение возбудителя через кольца и щетки ротора синхронного генератора подводится к его обмотке возбуждения LG , последовательно с которой соединена основная обмотка возбуждения $LE1$ возбудителя. Две другие его обмотки возбуждения получают питание от УАРВ, причем обмотка $LE2$ включена встречно, а обмотка $LE3$ — согласно с основной обмоткой $LE1$. В систему возбуждения входит подвозбудитель GEA в виде трехфазного генератора переменного тока с частотой 400 Гц. Магнитное поле возбуждения у подвозбудителя создают постоянные магниты, расположенные на роторе. Подвозбудитель служит источником питания УАРВ и создает начальное возбуждение возбудителя при пуске турбогенератора. Возбудитель и подвозбудитель связаны с валом генератора. Достоинством рассмотренной системы возбуждения является надежность схемы в связи с отсутствием коллектора у возбудителя.

Бесщеточная система возбуждения (рис. 12.20). Здесь, как и в диодно-электромашинной системе, возбудителем GE является генератор переменного тока повышенной частоты со своеобразным расположением обмоток: обмотка возбуждения LE расположена на статоре, а трехфазная обмотка переменного тока — на роторе. Такой генератор называют обращенным. Ротор возбудителя, как и в рассмотренных выше системах, связан с валом ротора синхронного генератора. На этом же валу установлены силовые диодные выпрямители $VS1$. Такое конструктивное решение позволяет жестко соединить между собой обмотку ротора возбудителя, выпрямители $VS1$ и обмотку возбуждения LG генератора. При этом необходимость в контактных кольцах и щетках отпадает, что существенно повышает надежность всей системы возбуждения. Обмотка возбуждения LE возбудителя GE получает питание от подвозбудителя GEA . Он выполнен аналогично возбудителю в диодно-электромашинной системе возбуждения. Его основная обмотка возбуждения $LA1$ включается последовательно с обмоткой возбуждения возбудителя LE , а дополнительная $LA2$ получает питание от устройства $APB2$. Возбуждение генератора G регулируется устройством $APB1$ путем воздействия на управляемые тиристоры VTQ . При этом изменяются ток в обмотке возбуждения LE возбудителя GE , его ЭДС и обусловленный ею ток в обмотке ротора LG генератора G .

Первые бесщеточные возбудители с диодными выпрямителями у нас в стране были созданы для турбогенераторов типов ТВВ и ТГВ мощностью 300 МВт. Затем бесщеточная система возбуждения была разработана для турбогенераторов мощностью 500 МВт атомных электростанций. Дальнейшее совершенствование бесщеточной системы возбуждения позволило применить ее в 1980 г. на

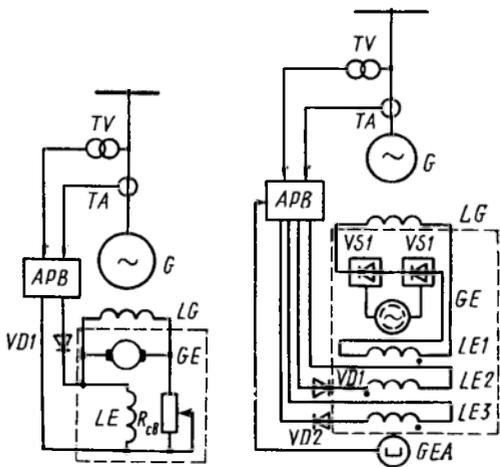


Рис. 12.18. Электромашинальная система возбуждения с генератором постоянного тока

Рис. 12.19. Диодно-электромашинная система возбуждения

турбогенераторах мощностью 1200 МВт Костромской ГРЭС и приступить к созданию головных образцов бесщеточных систем возбуждения турбогенераторов мощностью 1000 и 1500 МВт для атомных электростанций [104]. В частности, для двухполюсных и четырехполюсных турбогенераторов мощностью 1000 МВт созданы системы возбуждения с унифицированным комплектом аппаратуры.

Здесь индукторные подвозбудители заменены высоковольтными трансформаторами, использован полупроводниковый регулятор возбуждения сильного действия АРВ—СДП1. Продолжается также совершенствование бесщеточных систем возбуждения с тиристорами вместо диодов. В этом случае одной из технических проблем является передача на тиристоры, вращающиеся вместе с ротором возбудителя, управляющих воздействий от УАРВ.

Тиристорная система возбуждения (рис. 12.21).

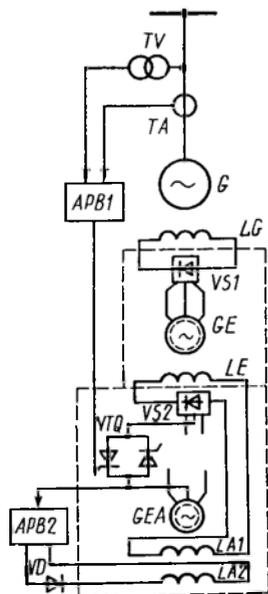


Рис. 12.20. Бесщеточная система возбуждения

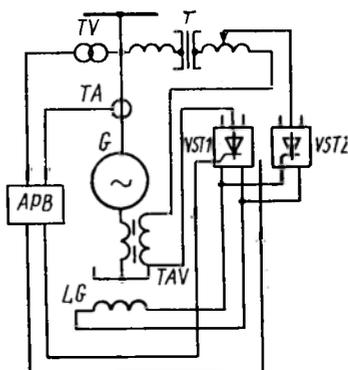


Рис. 12.21. Тиристорная система возбуждения

Эта система для турбогенераторов выполняется по схеме самовозбуждения. Источником питания системы возбуждения служит специальный трансформатор T , подключаемый к выводам генератора G . Иногда напряжение источника питания дополняют напряжением, пропорциональным току генератора. Для этой цели используют трансреактор TAV . В систему возбуждения входят два управляемых тиристорных выпрямителя. Один из них $VST1$ предназначен для форсировки возбуждения в аварийных режимах. К нему подводится полное напряжение источника питания, дополненное напряжением трансреактора. В нормальном режиме этот выпрямитель практически не действует. Для этих целей служит выпрямитель $VST2$. Он подключается к ответвлению обмоток трансформатора с напряжением, не превышающим половины напряжения на их выводах. При этом обеспечивается изменение тока возбуждения генератора в нормальных режимах работы от значения холостого хода до номинального значения. Выходы выпрямителей соединены параллельно и подключены к обмотке возбуждения LG генератора. Работой выпрямителей управляет устройство АРВ. Одно из достоинств тиристорной системы возбуждения — ее быстродействие, поэтому на генераторах с такой системой возбуждения устанавливаются устройства АРВ сильного действия, основным назначением которых является повышение устойчивости параллельной работы синхронных генераторов, связанных с энергосистемой протяженными сильно загруженными линиями электропередачи. В системы электроснабжения входят электростанции местного значения с генераторами сравнительно небольшой мощности (не более 100 МВт),

имеющими, как правило, электромашинный возбудитель постоянного тока. На генераторах таких электростанций обычно устанавливаются УАРВ пропорционального действия.

§ 12.9. УСТРОЙСТВА АРВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ЭЛЕКТРОМАШИНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В зависимости от характера входных сигналов и выходных воздействий устройства АРВ пропорционального действия можно разделить на несколько видов. На генераторах с электромашинным возбудителем постоянного тока применяются устройства:

компаундирования полным током (входной сигнал — изменение амплитуды тока I_r генератора);

компаундирования полным током с коррекцией напряжения (входные сигналы — изменения амплитуд тока и напряжения U_r генератора);

фазового компаундирования с коррекцией напряжения (входные сигналы — изменения амплитуды и фазы тока, а также амплитуды напряжения);

релейной форсировки (входной сигнал — изменение амплитуды напряжения генератора).

Первые три устройства имеют непрерывное выходное воздействие в виде среднего значения выпрямленного тока, изменяющегося непрерывно в функции входных сигналов и воздействующего на возбудитель синхронного генератора. Устройство релейной форсировки дискретно воздействует на возбудитель, закорачивая контактами реостат $R_{св}$ в цепи возбуждения возбудителя.

Компаундирование полным током. На рис. 12.22, а дана упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора, из которой следует, что $\underline{U}_r = \underline{E}_q - jI_r X_d$. Если ЭДС генератора E_q неизменная, то с увеличением тока статора I_r напряжение на выводах генератора снижается. Зависимость $U_r = f(I_r)$ — *внешняя характеристика* — представлена на рис. 12.22, б прямой $ac(ac')$. Очевидно, напряжение U_r остается неизменным, если с возрастанием тока, на-

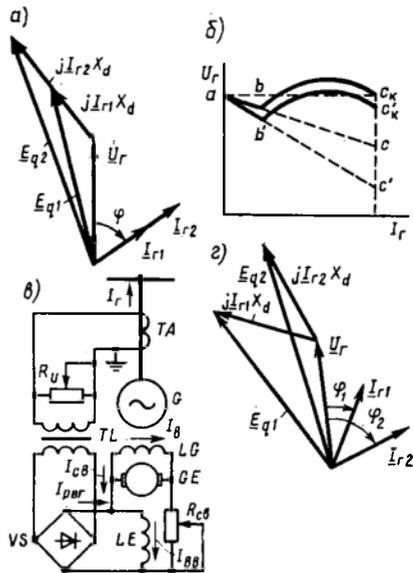


Рис. 12.22. Схема компаундирования синхронного генератора полным током

пример от I_{r1} до I_{r2} , увеличивается ЭДС соответственно от E_{q1} до E_{q2} (рис. 12.22, а). Характеристика холостого хода генератора даёт зависимость E_q от тока возбуждения (тока в обмотке ротора генератора) I_v . При определенных допущениях их относительные значения равны $E_q = I_v$. Поэтому снижение напряжения при увеличении тока I_r можно компенсировать подачей в обмотку возбуждения возбудителя (основную LE или дополнительную) тока $I_{рег}$, пропорционального току генератора I_r (рис. 12.22, в). Такое автоматическое регулирование возбуждения и называется *компаундированием полным током*.

Ток $I_{рег}$ получают путем выпрямления выходного тока промежуточного трансформатора TL , входным током которого является часть вторичного тока трансформатора тока TA . Ток $I_{рег}$ можно изменять изменяя коэффициент трансформации трансформатора TL и сопротивление установочного резистора R_U . В обмотке LE ток $I_{рег}$ проходит в одном направлении с током $I_{св}$ самовозбуждения возбудителя, общий ток возбуждения $I_{в.в}$ равен их сумме. Поэтому большему току генератора соответствует большая ЭДС и внешняя характеристика abc_k в значительном диапазоне изменения токов I_r идет выше линии ac (рис. 12.22, б). Излом в точке b внешней характеристики abc_k объясняется тем, что по мере снижения тока генератора при малых его значениях вторичная ЭДС трансформатора TL становится меньше напряжения на обмотке возбудителя LE , обусловленного током $I_{св}$, и выпрямитель VS устройства компаундирования закрывается. Излом отсутствует, если ток $I_{рег}$ поступает не в основную, а в дополнительную обмотку возбуждения. При больших значениях тока I_r из-за насыщения магнитопроводов генератора, возбудителя и трансформаторов схемы компаундирования наблюдается некоторое снижение внешней характеристики.

Действие устройства рассмотрено в предположении, что угол φ между током I_r и напряжением U_r не изменяется. В действительности характер нагрузки не остается постоянным. При этом, как следует из векторной диаграммы рис. 12.22, г, для поддержания напряжения U_r неизменным при увеличении угла, например от φ_1 до φ_2 , и заданном токе $I_{r1} = I_{r2}$ необходимо увеличивать ЭДС от E_{q1} до E_{q2} . Устройство компаундирования полным током это выполнить не сможет, так как реагирует только на амплитуду (абсолютное значение) тока I_r , устанавливая соответствующую ЭДС E_{q1} . Поэтому с увеличением угла φ напряжение U_r уменьшается, хотя в меньшей степени, чем у некомпанунированного генератора. На рис. 12.22, б меньшему углу φ_1 при отсутствии компаундирования соответствует внешняя характеристика abc , а большему углу φ_2 — характеристика $ab'c'$. Тем же значениям угла при наличии компаундирования соответствуют характеристики abc_k и $ab'c'_k$.

Обычно устройство компаундирования дополняется *корректором напряжения*, который реагирует на отклонение напряжения относительно заданного уровня. Такое название устройство получило потому, что оно лишь корректирует работу устройства компаундирования, выполняющего главную роль в регулировании возбуждения.

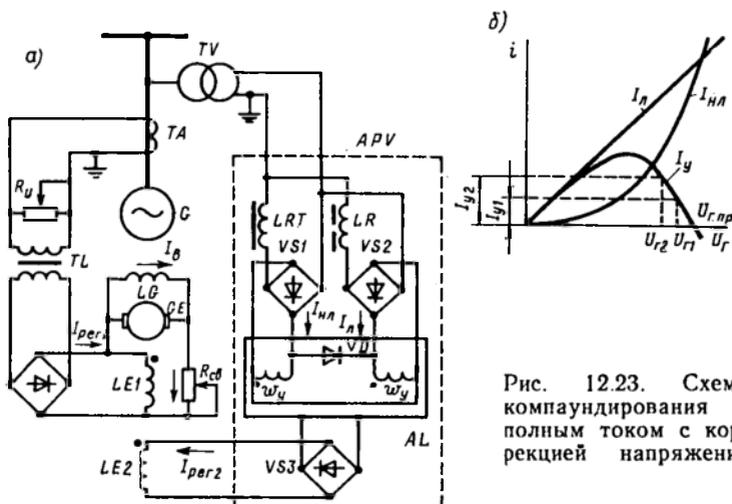


Рис. 12.23. Схема компаундирования полным током с коррекцией напряжения

Совместная работа устройства компаундирования и корректора напряжения осуществляется по двум принципиально различным схемам, а именно:

компаундирование полным током с коррекцией напряжения; в схеме ток от устройства компаундирования и ток от корректора напряжения предварительно выпрямляются, а затем направляются в соответствующие обмотки возбуждения возбудителя; при этом схема не реагирует на угол φ сдвига фаз между \underline{I}_r и \underline{U}_r ;

фазовое компаундирование с коррекцией напряжения; в схеме переменный ток от устройства компаундирования определяется геометрической суммой \underline{I}_r и тока, пропорционального \underline{U}_r , и зависит от тока корректора напряжения. Общий переменный ток выпрямляется; среднее значение выпрямленного тока пропорционально току \underline{I}_r , напряжению \underline{U}_r и углу φ сдвига фаз между ними.

Устройство компаундирования без корректора напряжения благодаря простоте, высокой надежности и достаточному быстродействию применяется в трехфазном исполнении для генераторов небольшой мощности.

Компаундирование полным током с коррекцией напряжения. При наличии корректора напряжения общий магнитный поток возбуждения возбудителя изменяется не только током I_{per1} от уст-

ройства компаундирования, но и током $I_{\text{рег } 2}$ от корректора, зависящим от напряжения генератора U_{Γ} таким образом, что снижение U_{Γ} ведет к возрастанию $I_{\text{рег } 2}$, а возрастание U_{Γ} — к его снижению.

На рис. 12.23, *a* схематично изображен широко применяемый электромагнитный корректор APV , состоящий из измерительного органа и усилителя с выпрямителем на его выходе. Воздействующей величиной измерительного органа является напряжение U_{Γ} , подводимое к нему от трансформатора напряжения TV . В измерительном органе использован способ преобразования воздействующей величины в две сравнимые, являющиеся разными ее функциями (см. рис. В.6, *a*). Преобразование выполняется линейным измерительным преобразователем (линейный реактор LR с воздушным зазором в магнитопроводе и выпрямитель $VS2$) и нелинейным элементом (насыщающийся реактор LRT или пятистержневой насыщающийся трансформатор, вторичные обмотки которого соединены в разомкнутый треугольник, и выпрямитель $VS1$). Ток I_{Γ} зависит от напряжения U_{Γ} линейно, а ток $I_{\text{нл}}$ — нелинейно (рис. 12.23, *б*). Для повышения чувствительности к несимметричным режимам измерительный орган выполняют трехфазным.

В электромагнитном корректоре применяется магнитный усилитель AL с двумя обмотками $\omega_{\text{у}}$ управления (см. § 1.4). В одну из них подается выпрямленный ток $I_{\text{нл}}$, а в другую — выпрямленный ток $I_{\text{нл}}$. Обмотки управления включены встречно, поэтому выходной ток AL — ток $I_{\text{рег } 2}$ — в дополнительной обмотке возбуждения $LE2$ пропорционален разности токов $I_{\text{у}} = I_{\text{л}} - I_{\text{нл}}$. Зависимость $I_{\text{у}} = f(U_{\Gamma})$ имеет в некоторой области падающий характер (рис. 12.23, *б*). Эта область и является рабочим участком характеристики корректора. При снижении напряжения, например от $U_{\Gamma 1}$ до $U_{\Gamma 2}$, разность токов возрастает от $I_{\text{у} 1}$ до $I_{\text{у} 2}$. Соответственно увеличивается ток $I_{\text{рег } 2}$, стремясь восстановить напряжение U_{Γ} . Рабочий участок характеристики корректора соответствует относительно небольшим снижениям напряжения, когда действие устройства компаундирования проявляется недостаточно. Если напряжение U_{Γ} превышает заданное (предписанное) значение $U_{\Gamma, \text{пр}}$, то ток $I_{\text{нл}}$ становится больше тока $I_{\text{л}}$. При этом корректор действует в сторону дальнейшего повышения напряжения. Для исключения этого токи в обмотках управления выравниваются, например путем соединения их между собой диодом VD . При $I_{\text{нл}} > I_{\text{л}}$ диод открывается и токи в обмотках выравниваются так, что $I_{\text{у}} \approx 0$.

Фазовое компаундирование с коррекцией напряжения. Из рассмотрения векторной диаграммы (см. рис. 12.22, *з*) следует, что при неизменном токе I_{Γ} снижение напряжения происходит за счет увеличения реактивной составляющей тока $I_{\Gamma} \sin \varphi$, поэтому для более точного регулирования U_{Γ} используется фазовое компаундирование с коррекцией напряжения, действующее в зависимости от

абсолютных значений напряжения \underline{U}_r , тока \underline{I}_r и от угла φ сдвига фаз между ними.

В упрощенной схеме АРВ (рис. 12.24, а) такая зависимость достигается путем применения промежуточного трансформатора тока с подмагничиванием $TLAT$ с двумя первичными обмотками, одна из которых ω_1' подключена к трансформатору тока TA , а вторая ω_1'' — к трансформатору напряжения TV через балластное сопро-

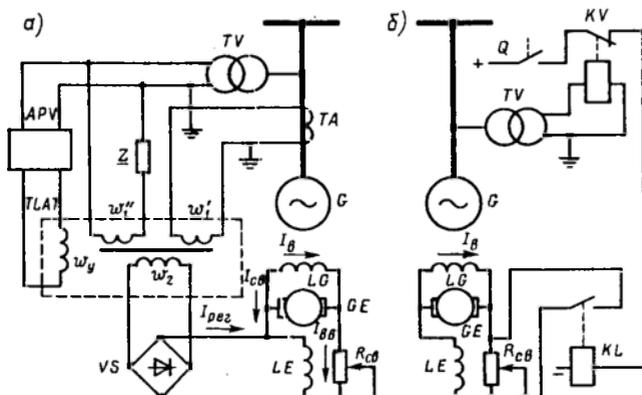


Рис. 12.24. Схемы устройства фазового компаундирования с коррекцией напряжения (а) и релейной форсировки возбуждения (б)

тивление \underline{Z} . Результирующая магнитодвижущая сила первичных обмоток создает во вторичной обмотке ω_2 ЭДС, зависящую от \underline{I}_r , \underline{U}_r и φ . Сочетание тока и напряжения, подводимых к $TLAT$, выбирается таким, чтобы при прочих равных условиях ЭДС обмотки ω_2 увеличивалась с увеличением φ , т. е. чтобы возрастал ток \underline{I}_{per} .

Кроме обмоток переменного тока промежуточный трансформатор имеет обмотку управления ω_y , по которой проходит ток \underline{I}_y корректора напряжения APV . Корректор напряжения выполняется аналогично рассмотренному выше, но настраивается так, что при возрастании напряжения \underline{U}_r подмагничивание трансформатора увеличивается, сердечник насыщается, коэффициент трансформации $TLAT$ возрастает и ток в обмотке ω_2 уменьшается, т. е. ток \underline{I}_{per} снижается. При понижении \underline{U}_r степень насыщения $TLAT$ уменьшается, условия трансформации становятся благоприятнее, а ток \underline{I}_{per} увеличивается. Электромагнитный корректор напряжения, выходной ток которого при понижении напряжения \underline{U}_r снижается (а не возрастает, как у корректора в схеме на рис. 12.23, а), называют *противовключенным*.

Достоинство фазового компаундирования состоит не только в большей, чем при токовом компаундировании, точности регулиро-

вания напряжения, но и в меньшей мощности, которую требуется получать от корректора (так как он не работает непосредственно на обмотку возбуждения). Маломощный корректор не только создает меньшую нагрузку на трансформатор напряжения, но и обладает малым запаздыванием, поэтому скорость восстановления напряжения возрастает.

Релейная форсировка. При значительных снижениях напряжения, обусловленных короткими замыканиями, рассмотренные устройства АВВ не всегда работают удовлетворительно. В устройствах компаундирования ток $I_{рег}$ пропорционален току к. з., поэтому при удаленных коротких замыканиях он оказывается недостаточным, а работа электромагнитных корректоров при малых напряжениях нарушается полностью, так как выходной ток I_y измерительного органа снижается вплоть до нуля (см. рис. 12.23, б). Кроме того, время реакции на изменения напряжения у рассмотренных устройств не всегда приемлемо. Поэтому в дополнение к этим устройствам на генераторах устанавливают устройства *релейной форсировки возбуждения*, скачкообразно (релейно) увеличивающие (форсирующие) возбуждение генератора.

В простейшем случае устройство релейной форсировки состоит из минимального реле напряжения KV и промежуточного реле KL (рис. 12.24, б). В нормальном режиме якорь реле KV подтянут и цепь обмотки реле KL разомкнута. При снижении напряжения генератора до значения, соответствующего уставке срабатывания реле KV , оно срабатывает и включает обмотку реле KL . Контактными реле KL закорачивается реостат $R_{св}$ в цепи самовозбуждения возбудителя. При этом напряжение на обмотке возбуждения возбудителя становится максимально возможным и ток возбуждения быстро нарастает. Чтобы предотвратить действие форсировки, когда генератор отключен, оперативный ток на контакты реле KV подается через вспомогательные контакты выключателя Q .

Как и рассмотренные выше схемы защиты с минимальным пусковым органом напряжения, релейная форсировка может подействовать неправильно при нарушениях в цепях напряжения. Для предотвращения этого применяют те же меры, что и в упомянутых схемах защиты: использование двух реле напряжения, подключенных к разным трансформаторам напряжения, применение запрета действия и др. Во вторичных цепях трансформаторов напряжения, питающих АВВ и реле напряжения релейной форсировки, предохранители, как правило, не устанавливают.

Напряжение срабатывания минимального реле напряжения выбирается с учетом надежного возврата реле (размыкание контактов) при номинальном напряжении. Если коэффициент отстройки принять $k_{отс} = 1,05$ и коэффициент возврата $k_{в} = 1,1$, то $U_{с.р} = 0,85 U_{г.ном} / KV$. Схема с одним реле напряжения имеет достаточную чувствительность при трехфазных коротких замыканиях и при замыканиях между фазами, к которым присоединено реле. Равную

чувствительность к разным видам короткого замыкания можно обеспечить, если включить реле через фильтр напряжения прямой последовательности или использовать в схеме три реле.

§ 12.10. УСТРОЙСТВО АРВ СИЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ АРВ — СДП1 СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ С ТИРИСТОРНОЙ СИСТЕМОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Устройство АРВ—СДП1 является сложной автоматической системой управления [105]. В процессе регулирования возбуждения оно выполняет ряд операций. В зависимости от режима работы генератора регулятор обеспечивает: регулирование возбуждения по заданной программе, релейную форсировку возбуждения, ограничение тока ротора в режиме потребления генератором реактивной мощности, автоматическую разгрузку генератора при перегрузке по току ротора и реактивному току статора, распределение реактивной мощности между параллельно работающими генераторами, автоматическое изменение уставки при синхронизации, пусках и остановах генератора, а также в случае его разгрузки по реактивной мощности. Заданная программа автоматического регулирования возбуждения сильного действия обеспечивается наличием следующих каналов регулирования: по отклонению напряжения генератора ΔU_r , по отклонению частоты Δf , по отклонению тока возбуждения I_b , по скорости изменения напряжения $dU_r/dt (U_r')$, по скорости изменения частоты $df/dt (f')$, по скорости изменения тока возбуждения $dI_b/dt (I_b')$. Функциональные части автоматического регулятора возбуждения выполнены в виде блоков, элементной базой которых являются микросхемы, биполярные и униполярные транзисторы, диоды (рис. 12.25).

Блок напряжения (БН) предназначен для изменения регулируемого напряжения и получения сигнала ΔU_r отклонения напряжения синхронной машины от значения напряжения, заданного уставкой U_{y1} и сигнала U_r' . Напряжение U_{y1} является уставкой АРВ. В БН напряжение синхронной машины U_r сравнивается с напряжением уставки U_{y1} . Уставка принимается такой, чтобы при $U_r = U_{r.ном}$ напряжение выхода БН было равно нулю. Уставка U_{y1} изменяется автоматически под воздействием блока уставки напряжения (БУН), блока ограничения тока ротора (БОР), блока ограничения минимального возбуждения (БОМВ), блока реактивного тока (БРТ).

Блок уставки напряжения (БУН) служит для изменения уставки U_{y1} блока БН. Предусматривается возможность дистанционного и автоматического изменения уставки. Автоматическое изменение уставки осуществляется в соответствии с заданной программой при пуске и останове синхронного генератора, а также в случаях его синхронизации и разгрузки по реактивной мощности при действии блока реактивного тока БРТ.

Блок подгонки уставки напряжения (БПУН) вместе с БУН автоматически изменяет уставку U_{y1} блока БН в случаях точной синхронизации и самосинхронизации, а также при переходах с резервного возбудителя на рабочий и с ручного управления на автоматическое регулирование возбуждения.

Блок ограничения минимального возбуждения (БОМВ) предназначен для ограничения потребляемой из сети генератором реактивной мощности значением, допустимым для заданной активной мощности, путем ограничения минимального значения тока возбуждения. Блок ОМВ содержит

устройство измерения активной составляющей тока статора. Реактивная составляющая тока поступает на вход БОМВ от БРТ. Пока реактивная мощность, потребляемая генератором из сети, не превышает допустимой, сигнал на выходе БОМВ отсутствует и БОМВ не оказывает влияния на работу УАРВ. Если потребляемая реактивная мощность превысит допустимое значение, то на выходе БОМВ появляется сигнал, который поступает на вход БН. При этом уставка напряжения U_{y1} увеличивается, в результате этого ток возбуждения возрастает и ограничит потребление реактивной мощности.

Блок реактивного тока (БРТ) предназначен для создания необходимого статизма, обеспечивающего распределение реактивной мощности между параллельно работающими синхронными генераторами, и для компенсации индуктивного падения напряжения в трансформаторе блока синхронный генератор — трансформатор. Компенсация падения напряжения обеспечивается путем воздействия БРТ на вход БН. С другого выхода БРТ сигнал поступает на БОМВ для ограничения минимального возбуждения и на БУН для разгрузки по реактивной мощности.

Блок тока (БТ) предназначен для измерения тока ротора и статора генератора и получения первой производной тока ротора I'_r и падения напряжения, пропорционального току ротора или статора, поступающего в блок измерения перегрузки (БИП) и в блок ограничения тока ротора (БОР) для ограничения перегрузки по току ротора или статора. Напряжение на выходе БТ пропорционально току (ротора или статора), значение которого в данный момент времени наиболее превосходит свое допустимое значение.

Блок измерения перегрузки (БИП) фиксирует перегрузку ротора (статора) генератора, ограничивает время перегрузки в зависимости от теплового состояния машины и ограничивает нагрузки в режиме остывания генератора при запрете повторной перегрузки. Блок состоит из фиксатора величины перегрузки, тепловой модели и фиксатора нагрева. Фиксатор перегрузки сравнивает напряжение уставки U_{y2} с напряжением, пропорциональным току ротора или статора генератора (от БТ). Фиксатор перегрузки включает в работу тепловую модель и через блок промежуточных реле (БПР) выдает сигнал о перегрузке генератора, а также воздействует на БОР.

Блок ограничения тока ротора (БОР) предназначен для ограничения тока ротора в режиме перегрузки при перегреве ротора и для ограничения тока ротора в режиме форсировки двукратной величиной по отношению к номинальному значению. В состав БОР входят: фиксатор перегрузки, устройство сигнализации о перегрузке (действует на БПР), устройство изменения уставки U_{y1} , АРВ (действует на БН) и устройство изменения уставки тока ротора с двукратного на номинальное значение тока ротора. На вход БОР поступают: напряжение с выхода БТ, напряжение с выхода БИП, пропорциональное нагреву генератора, команда от защиты ротора на ограничение перегрузки. В результате сравнения этих сигналов с уставкой напряжения U_{y3} выдается команда на изменение уставки АРВ (БН) и предусматривается соответствующая сигнализация.

Блок частоты и защиты (БЧЗ) состоит из блока частоты и блока защиты. Блок частоты осуществляет формирование сигналов, пропорциональных отклонению частоты Δf и ее производной f' , используемых для регулирования возбуждения генератора с целью повышения устойчивости при качаниях и переходных режимах в энергосистеме. Блок защиты предназначен для отключения каналов Δf и f' при увеличении либо напряжения, либо частоты выше предельно допустимых значений, а также при одновременном их повышении выше заданного значения, например при сбросе нагрузки.

Блок форсировки (БФ) обеспечивает форсировку возбуждения генератора при коротких замыканиях. На вход БФ подается напряжение ΔU_g . Оно сравнивается с напряжением уставки U_{y4} , которое принимается таким, что в нормальном режиме сигнал на выходе БФ отсутствует. Он появляется при коротких замыканиях в сети, поступает на вход блока усиления (БУ) и приводит к форсировке возбуждения. После отключения к.з. и восстановления напряжения генератора до $1,02 U_{y4}$ форсировка возбуждения снимается с за-

держкой около 0,2 с. Уставку срабатывания можно изменять в пределах от 0,8 до 0,9 номинального напряжения генератора ступенями, равными 0,01 $U_{г.ном}$. Коэффициент возврата БФ 1,02.

Блок обратной связи (БОС) обеспечивает в системе регулирования возбуждения жесткую отрицательную обратную связь по напряжению ротора. В состав БОС входят делитель напряжения ДН, преобразователь напряжения и измерительный элемент. Делитель напряжения предназначен для согласования напряжения ротора с входными параметрами устройства. Напряжение с выхода БОС поступает на вход БУ и используется как сигнал отрицательной обратной связи.

Блок усиления (БУ) предназначен для суммирования всех сигналов регулирования, усиления результирующего сигнала и воздействия на схему управления $СУ_{ф}$ форсированным $VST1$ и схему управления $СУ_{р}$ рабочим $VST2$ выпрямителями тиристорного возбудителя.

Блок контроля (БК) осуществляет контроль исправности устройства АРВ. Если ΔU_r на входе УАРВ не равно нулю, а напряжение выхода $U_{вых}$ отсутствует, то УАРВ неисправен. Информация о неисправности формируется в виде сигнала.

Блок промежуточных реле (БПР) используется для гальванической развязки выходных цепей сигнализации УАРВ от цепей оперативного напряжения электростанции.

§ 12.11. РЕГУЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Выше рассмотрены принципы действия устройств АРВ на примере генератора, работающего изолированно на собственную нагрузку. В действительности на электростанциях имеется несколько параллельно работающих генераторов. При наличии на генераторах устройств АРВ они при соответствующей настройке регуляторов все участвуют в регулировании напряжения на общих шинах. В систему электроснабжения может входить несколько электростанций, связанных между собой линиями электропередачи. Поддержание напряжения в контрольных пунктах системы обеспечивается совместной работой всех электростанций. При этом уровни напряжений отдельных узлов системы должны быть такими, чтобы перетоки реактивной мощности создавали минимальные потери. С некоторым допущением считают, что регулирование напряжения связано только с изменением реактивной нагрузки генераторов. Устройства АРВ должны действовать так, чтобы в процессе совместного регулирования напряжения параллельно работающие генераторы загружались наиболее экономично.

Устройства АРВ могут осуществлять регулирование напряжения по *астатической* и *статической характеристикам*, представляющим собой зависимость напряжения в заданной точке от реактивной составляющей тока статора генератора. В рассматриваемом случае параллельной работы генераторов автоматически регулируется напряжение $U_{ш}$ на шинах генераторного напряжения. При астатическом регулировании напряжение в заданной точке поддерживается постоянным независимо от реактивной составляющей то-

ка статора $I_r \sin \varphi$ (рис. 12.26, а, характеристика 2). При этом распределение реактивной мощности между генераторами оказывается неопределенным. Генератор, снабженный устройством АРВ с меньшей зоной нечувствительности (отклонение напряжения в обе стороны от заданного уровня, при котором устройство не действует), окажется перегруженным, а генератор с менее чувствительным устройством АРВ не будет участвовать в восстановлении напряжения и окажется недогруженным.

Заданного распределения реактивной мощности между генераторами можно достичь, если регулировать напряжение по статической характеристике (рис. 12.26, а, характеристика 3). Наклон характеристики определяется коэффициентом статизма $k_{ст} \approx \operatorname{tg} \alpha$. Изменяя коэффициент $k_{ст}$, можно достичь желаемого распределения реактивной мощности между генераторами в процессе автоматического регулирования напряжения. Мощность распределяется обратно пропорционально коэффициентам статизма $k_{ст1}$ и $k_{ст2}$ (рис. 12.26, б). Это справедливо

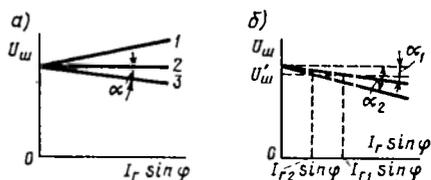


Рис. 12.26. Характеристики регулирования напряжения

для устройства АРВ без зоны нечувствительности. С появлением зоны нечувствительности точность распределения реактивной нагрузки нарушается. Погрешность увеличивается с ростом зоны нечувствительности и уменьшением коэффициента $k_{ст}$. При статическом регулировании напряжение с изменением реактивной нагрузки не остается постоянным. Пределы его изменения определяются коэффициентом $k_{ст}$ и не превышают $\Delta U_r = (0,02 \dots 0,03) U_{г.ном}$.

Если требуется автоматически регулировать напряжение в какой-либо точке системы, то устройства АРВ должны изменять напряжение на шинах в соответствии со статической характеристикой 1 (рис. 12.26, а). Крутизна характеристики определяется падением напряжения на участке от шин до заданной точки системы.

Рассмотренные выше устройства АРВ пропорционального действия являются статическими, обеспечивающими характеристику типа 3 (рис. 12.26, а). Для возможности изменять наклон характеристики 3 и обеспечивать характеристику типа 1 они снабжаются специальным устройством установки статизма. В процессе эксплуатации возникает необходимость изменять уровень регулируемого напряжения. Это достигается с помощью задающего элемента (элемента изменения уставки), позволяющего изменить напряжение, подводимое к корректору напряжения. Преднамеренное снижение напряжения на входе корректора устройством АРВ воспринимает как понижение регулируемого напряжения и увеличивает ток $I_{рег}$. Тем самым устанавливается новый, более высокий уровень напряжения. Для уменьшения уровня напряжения необ-

ходимо с помощью задающего элемента повысить напряжение на входе корректора. Изменение уровня напряжения сопровождается параллельным перемещением характеристики регулирования вдоль оси $U_{ш}$ (рис. 12.26, б).

В системах электроснабжения при наличии нескольких электростанций целесообразно работу каждой станции организовать по определенному режиму. При этом возникает необходимость в групповом управлении возбуждением генераторов станции. Процесс регулирования напряжения усложняется. Принципы выполнения устройств группового регулирования возбуждения рассмотрены в [77, 102, 103].

Глава 13

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 13.1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

В процессе эксплуатации возможны повреждения в трансформаторах и на их соединениях с коммутационными аппаратами. Могут быть также опасные ненормальные режимы работы, не связанные с повреждением трансформатора или его соединений. Возможность повреждений и ненормальных режимов обуславливает необходимость установки на трансформаторах защитных устройств.

Основными видами повреждений являются многофазные и однофазные короткие замыкания в обмотках и на выводах трансформатора, а также «пожар стали» магнитопровода. Однофазные повреждения бывают двух видов: на землю и между витками обмотки (витковые замыкания). Наиболее вероятны многофазные и однофазные короткие замыкания на выводах трансформаторов и однофазные витковые замыкания в обмотках. Значительно реже возникают многофазные короткие замыкания в обмотках. Для групп однофазных трансформаторов они вообще исключены. Защита от коротких замыканий выполняется с действием на отключение поврежденного трансформатора. Для ограничения размеров разрушений ее выполняют быстродействующей.

Замыкание одной фазы на землю опасно для обмоток, присоединенных к сетям с глухозаземленными нейтральными. В этом случае защита должна отключать трансформатор и при однофазных коротких замыканиях в его обмотках на землю. В сетях с нейтральными, изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы, защита от однофазных замыканий на землю с действием на отключение устанавливается на трансформаторе в том случае, если такая защита имеется в сети. При витковых замыканиях в

замкнувшихся витках возникает значительный ток, разрушающий изоляцию и магнитопровод трансформатора, поэтому такие повреждения должны отключаться быстродействующей защитой. Но использовать для этого токовые, дифференциальные или дистанционные защиты не представляется возможным. В самом деле, при малом числе замкнувшихся витков ток в поврежденной фазе со стороны питания может оказаться даже меньше значения номинального тока, а напряжение на выводах трансформатора практически не изменится.

Опасным внутренним повреждением является также «пожар стали» магнитопровода, который возникает при нарушении изоляции между листами магнитопровода, что ведет к увеличению потерь на перемагничивание и вихревые токи. Потери вызывают местный нагрев стали, ведущий к дальнейшему разрушению изоляции. Защиты, основанные на использовании электрических величин, на этот вид повреждения тоже не реагируют, поэтому возникает необходимость в применении специальной защиты от витковых замыканий и от «пожара стали». Для маслонаполненных трансформаторов такой защитой является *газовая*, основанная на использовании явлений газообразования. Образование газа является следствием разложения масла и других изолирующих материалов под действием электрической дуги при витковых замыканиях или недопустимого нагрева при «пожаре стали». Электрическая дуга возникает и при многофазных коротких замыканиях в обмотках. Поэтому газовая защита является универсальной защитой от всех внутренних повреждений трансформатора.

Ненормальные режимы работы трансформаторов обусловлены внешними короткими замыканиями и перегрузками. В этих случаях в обмотках трансформатора появляются большие токи (сверхтоки). Особенно опасны токи, проходящие при внешних коротких замыканиях; эти токи могут значительно превышать номинальный ток трансформатора. В случае длительного прохождения тока (что может быть при коротких замыканиях на шинах или при неотключившемся повреждении на отходящем от шин присоединении) возможны интенсивный нагрев изоляции обмоток и ее повреждение. Вместе с этим при коротком замыкании понижается напряжение в сети. Поэтому на трансформаторе должна предусматриваться защита, отключающая его при появлении сверхтоков, обусловленных неотключившимся внешним коротким замыканием.

Перегрузка трансформаторов не влияет на работу системы электроснабжения в целом, так как она обычно не сопровождается снижением напряжения. Кроме того, сверхтоки перегрузки относительно невелики и их прохождение допустимо в течение некоторого времени, достаточного для того, чтобы персонал принял меры к разгрузке. Так, согласно нормам, перегрузку током $I_{\text{пер}} = 1,6I_{\text{т.ном}}$ можно допускать в течение $t = 45$ мин. В связи с этим защита трансформатора от перегрузки при наличии дежурного персонала

должна выполняться с действием на сигнал. На подстанциях без дежурного персонала защита от перегрузки должна действовать на разгрузку или отключение.

К ненормальным режимам работы трансформаторов относится также недопустимое понижение уровня масла, которое может произойти, например, вследствие повреждения бака.

§ 13.2. ГАЗОВАЯ ЗАЩИТА

Газовая защита, как указывалось выше (см. § 13.1), основана на использовании явления газообразования в баке поврежденного трансформатора. Интенсивность газообразования зависит от характера и размеров повреждения. Это дает возможность выполнить газовую защиту, способную различать степень повреждения,

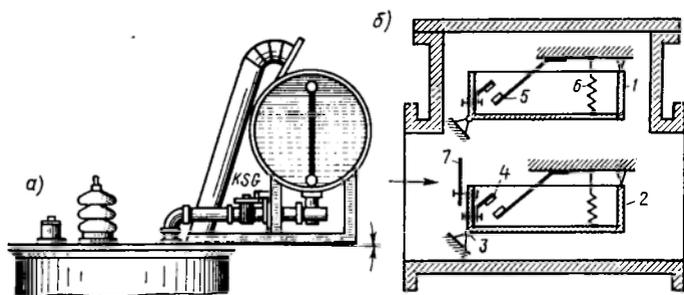


Рис. 13.1. Газовое реле защиты трансформатора

и в зависимости от этого действовать на сигнал или отключение.

Основным элементом газовой защиты является газовое реле *KSG*, устанавливаемое в маслопроводе между баком и расширителем (рис. 13.1, *a*). Ранее выпускалось поплавковое газовое реле ПГ-22. Более совершенно реле РГЧЗ-66 с чашкообразными элементами 1 и 2 (рис. 13.1, *b*).

Элементы выполнены в виде плоскодонных алюминиевых чашек, вращающихся вместе с подвижными контактами 4 вокруг осей 3. Эти контакты замыкаются с неподвижными контактами 5 при опускании чашек. В нормальном режиме при наличии масла в кожухе реле чашки удерживаются пружинами 6 в положении, указанном на рисунке. Система отрегулирована так, что масса чашки с маслом является достаточной для преодоления силы пружины при отсутствии масла в кожухе реле. Поэтому понижение уровня масла сопровождается опусканием чашек и замыканием соответствующих контактов. Сначала опускается верхняя чашка и реле действует на сигнал. При интенсивном газообразовании возникает сильный поток масла и газов из бака в расширитель через газовое реле. На пути потока находится лопасть 7, действующая вместе с нижней чашкой на общий контакт. Лопасть поворачивается и замыкает контакт в цепи отключения трансформатора, если скорость движения масла и газов достигает определенного значения, установленного на реле. Предусмотрены три уставки срабатывания отключающего элемента по скорости потока масла: 0,6; 0,9;

1,2 м/с. При этом время срабатывания реле составляет $t_{с.р.} = 0,05 \dots 0,5$ с. Уставка по скорости потока масла определяется мощностью и характером охлаждения трансформатора.

В нашей стране широко используется газовое реле с двумя шарообразными пластмассовыми поплавками типа BF 80/Q. Реле имеет некоторые конструктивные особенности. Однако принцип действия его такой же, как и других газовых реле.

Монтаж газовой защиты связан с выполнением некоторых специфических требований: для беспрепятственного прохода газов в расширитель должен быть небольшой подъем (1,0—1,5% у крышки трансформатора и 2—4% у маслопровода) от крышки к расширителю (рис. 13.1, а); нижний конец маслопровода, входящий внутрь трансформатора, должен заделываться с внутренней поверхности крышки, а нижний конец выхлопной трубы — вдаваться внутрь трансформатора; контрольный кабель, используемый для соединения газового реле с панелью защиты или промежуточной сборкой зажимов, должен иметь бумажную, а не резиновую изоляцию, так как резина разрушается под действием масла; действие газовой защиты на отключение необходимо выполнить с самоудерживанием, чтобы обеспечить отключение трансформатора в случае кратковременного замыкания или вибрации нижнего контакта газового реле, обусловленных толчками потока масла при бурном газообразовании.

В схеме защиты на переменном оперативном токе (рис. 13.2) самоудерживание достигается путем шунтирования нижнего контакта газового реле KSG верхним замыкающим контактом реле KL. Самоудерживание автоматически снимается после разрыва цепи отключения вспомогательным контактом Q1.2 выключателя Q1.

Достоинства газовой защиты: высокая чувствительность и реагирование практически на все виды повреждения внутри бака; сравнительно небольшое время срабатывания; простота выполнения, а также способность защищать трансформатор при недопустимом понижении уровня масла по любым причинам. Наряду с этим защита имеет ряд существенных недостатков, основной из которых — нереагирование ее на повреждения, расположенные вне бака, в зоне между трансформатором и выключателями. Защита может подействовать ложно при попадании воздуха в бак трансформатора, что может быть, например, при доливке масла, после ремонта системы охлаждения и др. Возможны также ложные срабатывания защиты на трансформаторах, установленных в районах, подверженных землетрясениям. В таких случаях допускается возможность перевода действия отключающего элемента на сигнал. В связи с этим газовую защиту нельзя использовать в качестве единственной защиты трансформатора от внутренних повреждений.

Необходимо также отметить, что начальная стадия виткового замыкания может и не сопровождаться появлением дуги и газооб-

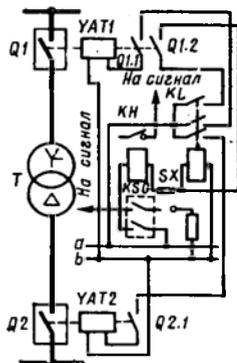


Рис. 13.2. Принципиальная схема газовой защиты трансформатора на переменном оперативном токе

разованием. В таком случае газовая защита не действует и витковые замыкания в трансформаторе могут длительно оставаться незамеченными. Можно создать защиту, позволяющую обнаружить витковые замыкания в начальной стадии и при отсутствии газообразования. Одна из таких защит основана на изменении пространственного распределения поля рассеяния обмоток [106].

Газовая защита обязательна для трансформаторов мощностью $P_T \geq 6300$ кВ·А. Допускается устанавливать газовую защиту и на трансформаторах меньшей мощности. Для внутрицеховых подстанций газовую защиту следует устанавливать на понижающих трансформаторах практически любой мощности, допускающих это по конструкции, независимо от наличия другой быстродействующей защиты.

§ 13.3. ТОКОВЫЕ И ТОКОВЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ

Газовая защита не действует при к.з. на выводах трансформатора и в его соединениях с выключателями, поэтому для отключения трансформатора при этих повреждениях на трансформаторах небольшой и средней мощности (менее 6,3 МВ·А) предусматривается токовая защита от многофазных к.з. Она содержит обычно две ступени: первую — токовую отсечку без выдержки времени, третью — максимальную токовую защиту. В ряде случаев она дополняется защитой от однофазных к.з. на выводах низшего напряжения трансформатора, питающего четырехпроводную сеть напряжением 0,4—0,23 кВ. В городских замкнутых сетях напряжением до 1 кВ для селективного отключения поврежденного трансформатора должна предусматриваться токовая направленная защита.

Токовая защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени от многофазных к.з. Защита устанавливается со стороны источника питания непосредственно у выключателя, при этом в зону действия защиты входят трансформатор и его соединения с выключателями. Срабатывая, защита действует на отключение выключателей. Она может быть выполнена посредством вторичных реле прямого и косвенного действия на переменном и постоянном оперативном токе. Схема соединения трансформаторов тока и реле выбирается в соответствии с указаниями, приведенными выше (см. § 5.2), с учетом действия защиты при всех возможных видах коротких замыканий.

Селективность отсечки обеспечивается выбором ее тока срабатывания по выражению $I_{с.з}^1 = k_{отс}^1 I_{к.вн}^{(3) \max}$. Максимальный ток внешнего короткого замыкания $I_{к.вн}^{(3) \max}$ определяется при повреждении на шинах низшего напряжения в точке K_1 (рис. 13.3, а). Коэффициент отстройки $k_{отс}^1$ в зависимости от типа реле, как и для отсечки линии (см. § 5.3), принимается $k_{отс}^1 = 1,2 \dots 2,0$, при

этом отсечка без выдержки времени оказывается отстроенной от бросков тока намагничивания. Сопротивление трансформатора обычно достаточно велико, поэтому при к.з. со стороны питания (точка K_2) ток повреждения значительно превышает $I^{(3)}_{к.вн\ max}$. Указанное соотношение токов дает возможность использовать токовую отсечку без выдержки времени в качестве защиты трансформаторов, причем она обычно обладает достаточной чувствительностью к коротким замыканиям со стороны питания ($k_{ч} \geq 2,0$). Недостаток отсечки без выдержки времени состоит в неполной защите трансформаторов. В ее зону действия входит только часть обмотки. Защита не реагирует на короткие замыкания на выводах и в соединениях с выключателем со стороны низшего напряжения (точка K_3).

Для отключения коротких замыканий на выводах и в соединениях с выключателем со стороны низшего напряжения (точка K_3) токовая отсечка без выдержки времени дополняется максимальной токовой защитой, полностью защищающей трансформатор и являющейся вместе с тем его защитой от сверхтоков внешних коротких замыканий. Получается защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени без второй ступени.

Схема такой защиты на оперативном переменном токе рассмотрена выше (см. § 5.7, рис. 5.19).

При установке на трансформаторе защита действует на отключение выключателя со стороны высшего напряжения. Его вспомогательный контакт $Q1.1$ управляет цепью электромагнита $YAT2$ отключения выключателя $Q2$, установленного со стороны низшего напряжения (как показано на рис. 13.3, а). Параметры максимальной токовой защиты выбирают в соответствии с изложенным выше: выдержка времени — на ступень Δt больше максимальной выдержки времени $t_{эл\ max}$ защит предыдущих элементов, а ток срабатывания — из условия предотвращения срабатывания защиты при перегрузках по выражению (5.7). При этом коэффициент чувствительности должен быть $k_{ч} \geq 1,5$ при коротких замыканиях на низшей стороне трансформатора и $k_{ч} \geq 1,2$ при коротких замыканиях в конце линий, отходящих от шин низшего напряжения.

На параллельно работающих трансформаторах защита со ступенчатой характеристикой выдержки времени сохраняет селективность только при коротких замыканиях в зоне первой ступени; селективное действие третьей ступени обеспечивается лишь при наличии на шинах низшего напряжения параллельно работающих

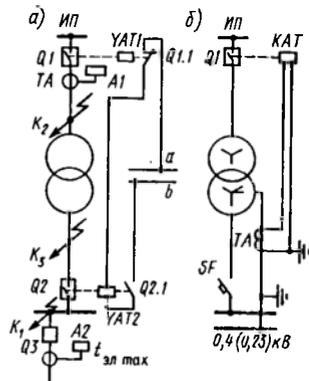


Рис. 13.3. Принципиальные схемы токовых защит трансформатора

трансформаторов секционного выключателя с защитой, имеющей меньшую выдержку времени. Защита имеет недостаточную чувствительность к витковым замыканиям и не обеспечивает требуемого быстрого действия при многофазных повреждениях в обмотке. Для повышения чувствительности к повреждениям внутри бака защита со ступенчатой характеристикой дополняется газовой защитой.

Защита от коротких замыканий на землю. В распределительных сетях широко применяются понижающие трансформаторы с

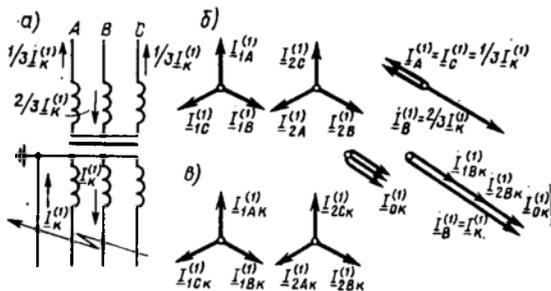


Рис. 13.4. Токи однофазного короткого замыкания на стороне низшего напряжения трансформатора с соединением обмоток Y/Y_{Δ} — 12

соединением обмоток Y/Y_{Δ} (звезда — звезда с заземленной нейтралью) и четырехпроводной системой со стороны низшего напряжения 0,4—0,23 кВ. В такой системе однофазные к. з. на землю и замыкание фазы на нейтральный провод (рис. 13.3, б и 13.4, а) сопровождаются значительными токами повреждения и представляют опасность для

трансформатора. Поэтому на понижающих трансформаторах с высшим напряжением до 35 кВ предусматривают действие защиты на отключение при указанных повреждениях на стороне низшего напряжения трансформатора в пределах до шин 0,4 (0,23) кВ. При этом короткие замыкания на отходящих от шин присоединениях должны отключаться защитой этих присоединений.

При коротком замыкании, например фазы B , на нейтральный провод ток $I_{\Delta K}^{(1)}$, как и любой ток однофазного к. з., содержит составляющие прямой $I_{1K}^{(1)}$, обратной $I_{2K}^{(1)}$ и нулевой $I_{0K}^{(1)}$ последовательностей, причем $I_{1K}^{(1)} = I_{2K}^{(1)} = I_{0K}^{(1)}$ (рис. 13.4, в).

Мощность рассматриваемых трансформаторов обычно во много раз меньше мощности питающей энергосистемы, поэтому ток $I_{\Delta K}^{(1)}$ можно определить без учета сопротивлений системы:

$$I_{\Delta K}^{(1)} = 3U_{\Phi} / (X_{1T} + X_{2T} + X_{0T}), \quad (13.1)$$

где X_{1T} , X_{2T} , X_{0T} — соответственно сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательности трансформатора, Ом.

Для трансформатора при любой группе соединения обмоток $X_{1T} = X_{2T}$, сопротивление X_{0T} для двухобмоточного трансформатора с указанной схемой соединения обмоток определяется сопротивлением намагничивания $X_{0\text{нам}}$, которое значительно больше сопротивления X_{1T} [14]. Например, для трансформатора мощностью 1000 кВ·А, напряжением 10,5/0,4 кВ сопротивление $X_{0T} \approx 9X_{1T}$, поэтому ток $I_{\Delta K}^{(1)}$ оказывается в несколько раз меньшим токов трехфазного $I_{\Delta K}^{(3)}$.

и двухфазного $I_{\kappa}^{(2)}$ коротких замыканий:

$$I_{\kappa}^{(3)} = U_{\phi}/X_{1\tau} \text{ и } I_{\kappa}^{(2)} = \sqrt{3} U_{\phi}/(X_{1\tau} + X_{2\tau}).$$

Обычно ток однофазного короткого замыкания недостаточен для действия токовой защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени. При этом, как следует из распределения токов на стороне высшего напряжения (рис. 13.4, б), наиболее простая однорелейная схема защиты с включением реле на разность токов двух фаз, например A и C , вообще непригодна, так как отказывает в действии при повреждении на землю фазы B , а схема неполной звезды может оказаться недостаточно чувствительной и поэтому должна дополняться третьим реле, включенным в обратный провод. Из-за этого в ряде случаев применяется специальная токовая защита нулевой последовательности (см. рис. 13.3, б), выполненная посредством, например, вторичного реле КАТ прямого действия типа РТВ. Реле присоединяется к трансформатору тока ТА, установленному в нулевом проводе между силовым трансформатором и точкой заземления нейтрали. При нормальной работе ток в реле определяется несимметрией нагрузки и токами 3-й гармонической, имеющей наибольшее значение при подключении к трансформатору газоразрядных ламп.

В соответствии с ГОСТ 11687—75* двухобмоточный трансформатор со схемой соединения обмоток Y/Y_0 рассчитан на продолжительный ток нагрузки нейтрали не более 25% номинального тока обмотки низшего напряжения. При этом ни в одной из фаз ток не должен превышать номинальное значение более чем на 5%. Поэтому условие для выбора тока срабатывания имеет вид

$$I_{с.р.} = 0,25 k_{отс} k_{пер} I_{т.ном} / (k_n K_I), \quad (13.2)$$

где $k_{пер}$ — коэффициент, учитывающий перегрузку; для масляных трансформаторов, согласно [3], $k_{пер} = 1,4$; $k_{отс} = 1,1 \dots 1,2$.

Выдержка времени защиты согласуется с временем действия защит на отходящих линиях. Чувствительность защиты проверяется по минимальному значению тока однофазного короткого замыкания на шинах низшего напряжения, которое можно найти по выражению (11.3) при $Z_n = 0$ (см. § 11.3). Чувствительность считается достаточной, если $k_{\chi} \geq 1,5$. Обычно защита присоединений, отходящих от шин 0,4 (0,23) кВ, выполняется плавкими предохранителями и автоматическими выключателями с зависимой характеристикой выдержки времени, поэтому для защиты от коротких замыканий на землю на стороне низшего напряжения трансформатора применяют реле с зависимой характеристикой (типа РТВ₁, РТ-80), поэтому обеспечивается лучшее согласование защит.

Рассмотренная защита должна применяться с учетом вероятности однофазных повреждений на выводах трансформатора со стороны низшего напряжения и в соединениях с шинами 0,4 (0,23) кВ. При незначительных расстояниях между трансформато-

ром и распределительным щитом 0,4 (0,23) кВ (до 30 м) и тщательном выполнении проводки между ними возможность повреждения невелика и защиту допускается не применять.

У трансформаторов с соединением обмоток по схеме Δ/Y_0 (треугольник — звезда с заземленной нейтралью) сопротивление нулевой последовательности практически равно сопротивлению прямой последовательности, поэтому токи однофазного и трехфазного короткого замыкания при повреждении у выводов низшего напряжения трансформатора имеют примерно одинаковое значение. В том и в другом случае повреждения должны отключаться третьей ступенью токовой защиты трансформатора.

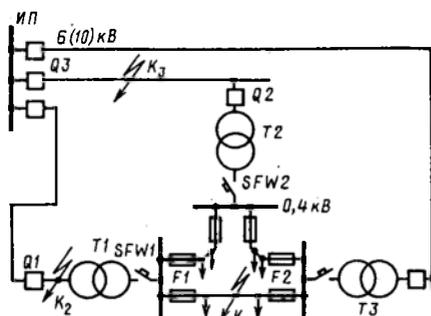


Рис. 13.5. Схема простейшей замкнутой сети напряжением до 1 кВ

Зашита трансформаторов в замкнутых сетях напряжением до 1 кВ. Целесообразность построения городских замкнутых сетей напряжением до 1 кВ не вызывает сомнения [107]. В зарубежной практике такие сети успешно эксплуатируются довольно продолжительное время. В качестве аппаратов используются плавкие предохранители в совокупности с автоматами обратной мощности [108, 109].

Селективное отключение элементов простейшей замкнутой сети напряжением до 1 кВ (рис. 13.5) обеспечивается предохранителями, установленными по концам линий, и автоматами SFW обратной мощности, установленными на стороне низшего напряжения трансформаторов $T1—T3$. В нормальном режиме и при повреждении в сети (точка K_1) через все трансформаторы, а следовательно, и через автоматы обратной мощности проходит мощность в прямом направлении, т. е. от источника питания $ИП$ к потребителям замкнутой сети. Автоматы обратной мощности при этом не срабатывают, поврежденная линия отключается своими предохранителями $F1, F2$.

Если повреждается какой-либо трансформатор, например $T1$ (точка K_2), то мощность через трансформатор $T1$ и автомат обратной мощности $SFW1$ изменяет направление, проходя из замкнутой сети к месту повреждения. Автомат обратной мощности $SFW1$, реагируя на изменение направления мощности, отключает поврежденный трансформатор $T1$ со стороны низшего напряжения. Со стороны высшего напряжения трансформатор отключается защитой, действующей на его выключатель $Q1$. Поврежденные трансформаторы остаются в работе, электроснабжение потребителей сохраняется полностью.

Если повреждается какой-либо трансформатор, например $T1$ (точка K_2), то мощность через трансформатор $T1$ и автомат обратной мощности $SFW1$ изменяет направление, проходя из замкнутой сети к месту повреждения. Автомат обратной мощности $SFW1$, реагируя на изменение направления мощности, отключает поврежденный трансформатор $T1$ со стороны низшего напряжения. Со стороны высшего напряжения трансформатор отключается защитой, действующей на его выключатель $Q1$. Поврежденные трансформаторы остаются в работе, электроснабжение потребителей сохраняется полностью.

При повреждении одной из питающих линий, в частности в точке K_3 , электроснабжение также полностью сохраняется. Поврежденная линия со стороны $ИП$ отключается своим выключателем $Q3$ под действием релейной защиты, а со стороны трансформаторного пункта — вместе с трансформатором $T2$ автоматом обратной мощности $SFW2$. В нашей стране такие автоматы не выпускаются, поэтому в городах, где применяются замкнутые сети напряжением до 1 кВ, защита осуществляется переделанными счетчиками, реле направления мощности разных типов и другими аппаратами, не предназначенными для такой цели. В свое время был разработан комплект защиты РОМ-3, состоящий из электромеханических реле. Однако эксплуатация опытной партии показала его принципиальные и конструктивные недостатки [110]. Наиболее совершенная защита на полупроводниках, разработанная Рижским политехническим институтом [111]. В работе принимал участие Ульяновский политехнический институт. Созданы три модификации защиты применительно к различным схемам распределительных сетей.

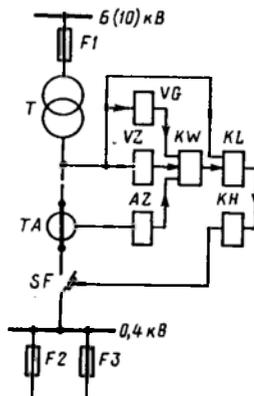


Рис. 13.6. Структурная схема полупроводниковой защиты

На рис. 13.6 показана структурная схема наиболее простой модификации, которая рекомендуется к установке в сетях рассмотренного типа (см. рис. 13.5). Комплект защиты предназначен для работы от трансформаторов тока TA серий ТК-40 и ТК-20. Реле направления мощности KW включается на составляющие прямой последовательности тока (фильтр AZ) и напряжения (фильтр VZ). При этом обеспечивается его срабатывание при всех возможных видах короткого замыкания в защищаемой зоне. Реле создано на принципе сравнения фаз двух электрических величин. Угол максимальной чувствительности реле $\varphi_{p\max} = \pi/12$. Фильтр тока AZ и фильтр напряжения VZ прямой последовательности можно выполнить в соответствии со схемами, рассмотренными выше (см. § 1.7). Фильтр напряжения включается непосредственно в сеть.

Блок питания VG обеспечивает нормальную работу схемы при значительных колебаниях напряжения сети. Исполнительный релейный элемент KL выполнен на полупроводниках и работает от остаточного напряжения сети. При срабатывании реле направления мощности KW создается цепь на катушку отключения автомата SF , в которую включено и указательное реле KH .

§ 13.4. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Дифференциальный принцип позволяет выполнить быстродействующую защиту трансформатора, реагирующую на повреждения в обмотках, на выводах и в соединениях с выключателями. При этом она может иметь недостаточную чувствительность только при витковых замыканиях и «пожаре стали». Для осуществления защиты используются трансформаторы тока TAI , $TAII$, установленные с обеих сторон защищаемого трансформатора вблизи выключателя.

чателей $Q1, Q2$ (рис. 13.7, а). Вторичные обмотки трансформаторов тока и реле KA соединяются в схему продольной дифференциальной защиты с циркулирующими токами. При этом в реле KA , как и в реле рассмотренных выше дифференциальных защит (см. § 9.3, 12.2), при отсутствии повреждения в защищаемой зоне проходит ток небаланса. Однако этот ток в дифференциальной защите трансформатора определяется не только погрешностью трансформаторов тока, но и рядом дополнительных факторов. Они обуславливают особенности схемы, усложняют ее и должны учитываться при выполнении дифференциальной защиты трансформатора. Рассмотрим эти факторы на примере защиты двухобмоточного трансформатора.

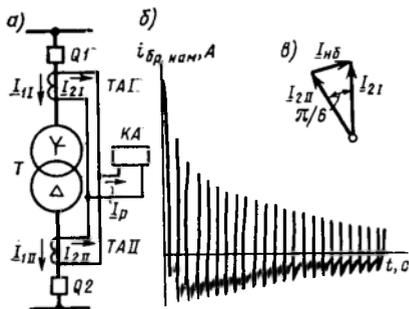


Рис. 13.7. Дифференциальная токовая защита двухобмоточного трансформатора

Ток намагничивания трансформатора. У силовых трансформаторов коэффициент трансформации $n_T = U_{I1}/U_{I2} \neq 1,0$, поэтому в защите должны сравниваться токи I_{11} и I_{11}/n_T . При отсутствии повреждения в защищаемой зоне ток намагничивания $I_{\text{нам}} = I_{11} - I_{11}/n_T$ обуславливает

неравенство сравниваемых токов I_{11} и I_{11}/n_T . В связи с этим в обмотке реле появляется дополнительная составляющая тока небаланса $I_{\text{нб. нам}}$, которая при нормальной работе и внешних коротких замыканиях незначительна и поэтому может не учитываться.

Иное происходит при появлении в питающей обмотке трансформатора броска тока намагничивания $I_{\text{бр. нам}}$, максимальные мгновенные значения которого достигают 6—8-кратных значений амплитуды номинального тока в первый момент включения трансформатора под напряжение и при восстановлении напряжения после отключения внешних коротких замыканий. Ток намагничивания, проходя через реле, может вызвать неправильное срабатывание защиты. Переходный ток намагничивания содержит значительные высшие гармонические (2-ю и 3-ю), а также значительную апериодическую составляющую, в результате чего кривая его мгновенных значений почти полностью смещается от оси времени (рис. 13.7, б).

Время полного затухания переходного тока намагничивания определяется постоянными времени ветви намагничивания трансформатора и сети и может достигать нескольких секунд. Однако уже по истечении времени $t = 0,3 \dots 0,5$ с его максимальные мгновенные значения становятся меньше амплитуды номинального тока трансформатора. Отстройка дифференциальной защиты от

бросков тока намагничивания является *первым условием* при выборе тока срабатывания. В этом случае другими слагающими тока небаланса, малыми по сравнению с $I_{бр. нам}$, можно пренебречь, поэтому расчетный первичный ток небаланса $I_{нб. рсч \max 1} \approx I_{бр. нам}$.

Отстройка защиты от броска тока намагничивания достигается в основном тремя путями: заглублением защиты по току срабатывания; включением реле через промежуточные насыщающиеся трансформаторы тока (НТТ); выявлением различия между формой кривой тока к.з. и формой кривой тока намагничивания (реле в комплекте устройства ЯРЭ-2201). При этом ток срабатывания выбирают исходя из значения номинального тока трансформатора по условию

$$I_{с.з} \geq k_{отс} I_{т. ном} \quad (13.3)$$

В зависимости от используемых реле и способа отстройки коэффициент $k_{отс}$ принимается равным 0,3 ... 4,5.

Схемы соединения обмоток трансформатора. Так как $n_{т} \neq 1,0$, то при нормальной работе и сверхтоках, обусловленных перегрузкой или внешними короткими замыканиями, токи I_{1I} и I_{1II} на стороне высшего U_{1I} и низшего U_{1II} напряжений не равны между собой. В трансформаторах с соединением обмоток $Y/Y-12$ токи отличаются только по абсолютному значению (ток намагничивания не учитывается).

В случае разного соединения обмоток трансформатора, например по схеме Y/Δ , первичные токи сдвинуты по фазе на угол, определяемый группой соединения обмоток. Соответственно сдвинуты по фазе и вторичные токи I_{2I} и I_{2II} .

Для группы соединения $Y/\Delta-11$ угол сдвига фаз составляет $\pi/6$ (рис. 13.7, в). Поэтому при отсутствии повреждения в защищаемой зоне в симметричном режиме в обмотке реле появляется значительный ток $I_{нб} = 2I_{2I} \sin(\pi/12)$. Для его устранения необходимо, чтобы сравниваемые вторичные токи независимо от группы соединения трансформатора совпадали по фазе.

При принятых условных положительных направлениях токов (рис. 13.8)

$$\underline{I}_{A\Delta} = \underline{I}_a - \underline{I}_\beta; \quad \underline{I}_{B\Delta} = \underline{I}_\beta - \underline{I}_\gamma; \quad \underline{I}_{C\Delta} = \underline{I}_\gamma - \underline{I}_a.$$

Кроме того,

$$\underline{I}_{AY} = \sqrt{3} \underline{I}_a / n_{т}; \quad \underline{I}_{BY} = \sqrt{3} \underline{I}_\beta / n_{т}; \quad \underline{I}_{CY} = \sqrt{3} \underline{I}_\gamma / n_{т}.$$

Из этих соотношений получается

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{A\Delta} &= n_{т} (\underline{I}_{AY} - \underline{I}_{BY}) / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_{B\Delta} &= n_{т} (\underline{I}_{BY} - \underline{I}_{CY}) / \sqrt{3}; \\ \underline{I}_{C\Delta} &= n_{т} (\underline{I}_{CY} - \underline{I}_{AY}) / \sqrt{3}; \end{aligned} \right\} \quad (13.4)$$

Выражения (13.4) показывают, что дифференциальная защита трансформаторов с соединением обмоток $Y/\Delta-11$ должна выполняться так, чтобы сравни-

вались совпадающие по фазе токи: $I_{A\Delta}$ и $(I_{AY} - I_{BY})$; $I_{B\Delta}$ и $(I_{BY} - I_{CY})$; $I_{C\Delta}$ и $(I_{CY} - I_{AY})$. Это достигается путем соединения вторичных обмоток трансформаторов тока TAI , установленных со стороны звезды защищаемого трансформатора, по схеме треугольника, а $TAII$ со стороны его треугольника — по схеме звезды. Группа соединения трансформаторов тока должна соответствовать группе соединения обмоток защищаемого трансформатора. При этом в случае заземленной нейтрали (рис. 13.8) по схеме треугольника должны соединяться именно трансформаторы тока TAI со стороны звезды защищаемого трансформатора. Действительно, если эти трансформаторы тока соединить в звезду, а трансформаторы тока $TAII$ со стороны треугольника защищаемого трансформатора — в треугольник, то из выражения (13.4) имеем

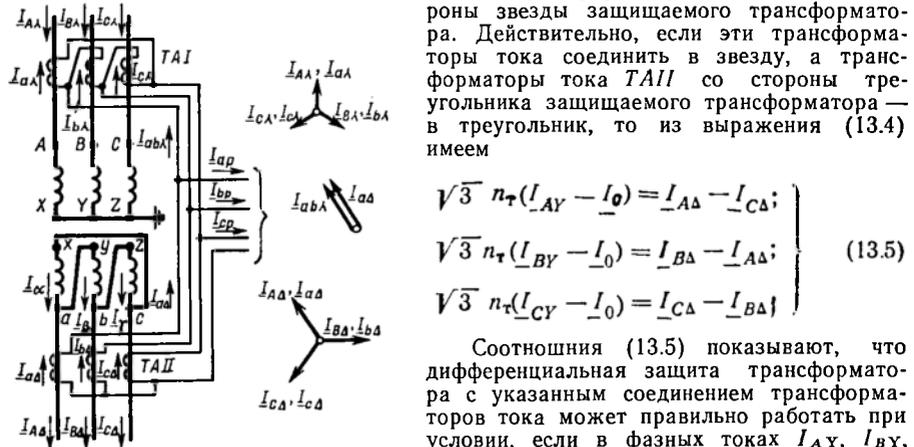


Рис. 13.8. Токораспределение и векторные диаграммы токов в цепях трансформатора и дифференциальной токовой защиты

Соотношения (13.5) показывают, что дифференциальная защита трансформатора с указанным соединением трансформаторов тока может правильно работать при условии, если в фазных токах I_{AY} , I_{BY} , I_{CY} при нормальной работе и внешних коротких замыканиях нет составляющей нулевой последовательности I_0 . Такое положение имеется лишь при изолированной нейтрали трансформатора.

Соединение трансформаторов тока по схеме треугольника со стороны звезды защищаемого трансформатора с заземленной нейтралью исключает проникновение токов нулевой последовательности в цепи циркуляции и в реле и тем самым предотвращает возможность неправильной работы защиты при внешних коротких замыканиях на землю.

Коэффициенты трансформации трансформаторов тока. Номинальные токи защищаемого трансформатора определяются с каждой его стороны по номинальной мощности $S_{T,ном}$:

$$I_{T,номY} = S_{T,ном} / (\sqrt{3} U_Y); \quad I_{T,ном\Delta} = S_{T,ном} / (\sqrt{3} U_{\Delta}).$$

Расчетные коэффициенты трансформации трансформаторов тока выбираются исходя из равенства абсолютных значений сравниваемых вторичных токов, в данном случае $I_{A\Delta}$ и I_{aBY} (рис. 13.8). С учетом коэффициента схемы $k^{(3)}_{сх}$ и при вторичном номинальном токе $I_{2,ном} = 5$ А коэффициент трансформации $K_I = k^{(3)}_{сх} I_{T,ном} / 5$. При принятых обозначениях первичных номинальных токов коэффициенты трансформации трансформаторов тока равны:

$$\text{для соединенных по схеме звезды } K_{IY} = I_{T,ном\Delta} / 5;$$

$$\text{для соединенных по схеме треугольника } K_{I\Delta} = \sqrt{3} I_{T,номY} / 5.$$

Получающиеся расчетные коэффициенты в общем случае отличаются от коэффициентов трансформации, которые принимаются по шкале номинальных токов как ближайшие большие. В связи с этим токи в цепях циркуляции могут быть различными и обуславливают дополнительную составляющую тока небаланса:

$$I_{\text{нб.вр}} = (\Delta f_{\text{вр}}/100) (I_{\text{к.нн ма}}^{(3)} / K_I), \quad (13.6)$$

где $\Delta f_{\text{вр}} = [(I_{2I} - I_{2II}) / I_{2I}] 100$ — погрешность от неточности выравнивания токов.

При $\Delta f_{\text{вр}} > 5\%$ токи выравниваются автотрансформаторами или уравнивательными обмотками реле с НТТ (см. § 13.5).

Автоматическое регулирование коэффициента трансформации. Регулирование коэффициента трансформации защищаемого трансформатора (см. § 13.10) нарушает соотношение между первичными токами I_{1I} и I_{1II} . В связи с этим нарушается степень выравнивания токов в цепях циркуляции, а в реле появляется дополнительная составляющая тока небаланса $I_{\text{нб.рег}}$, пропорциональная диапазону изменения напряжения $\Delta U_{\text{рег}}$ в одну сторону от номинального:

$$I_{\text{нб.рег}} = (\Delta U_{\text{рег}}/100) (I_{\text{к.нн мах}}^{(3)} / K_I). \quad (13.7)$$

Разнотипность трансформаторов тока. Разнотипность трансформаторов тока, установленных со стороны высшего и низшего напряжений, обуславливает различие их характеристик намагничивания и в связи с этим приводит к увеличению составляющей тока небаланса $I_{\text{нб.пгр}}$, определяемой полной погрешностью трансформаторов тока ϵ (%):

$$I_{\text{нб.пгр}} = (k_{\text{одн}} k_{\text{вп}} \epsilon / 100) (I_{\text{к.нн мах}}^{(3)} / K_I). \quad (13.8)$$

У трехобмоточных трансформаторов, а также у двухобмоточных с расщепленными обмотками не одинаковы кратности тока при внешних коротких замыканиях для трансформаторов тока, установленных с разных сторон защищаемого трансформатора. Это обуславливает различную степень намагничивания магнитопровода трансформаторов тока и увеличивает тем самым составляющую $I_{\text{нб.пгр}}$. Неидентичность характеристик трансформаторов тока учитывается коэффициентом однотипности $k_{\text{одн}}$, который для дифференциальной защиты трансформатора принимается максимальным ($k_{\text{одн}} = 1,0$).

Из изложенного следует, что ток небаланса дифференциальной защиты трансформатора при внешних коротких замыканиях имеет повышенное значение: в худшем случае все рассмотренные составляющие (13.6)—(13.8) складываются арифметически, образуя при внешнем коротком замыкании максимальный расчетной ток

небаланса:

$$I_{\text{нб.рсч max}} = I_{\text{нб.нгр}} + I_{\text{нб.рег}} + I_{\text{нб.вр}} = \\ = [(k_{\text{ап}} \varepsilon + \Delta U_{\text{рег}} + \Delta f_{\text{вр}}) / 100] (I_{\text{к.вн max}}^{(3)} / K_I). \quad (13.9)$$

При максимальных $\Delta U_{\text{рег}} = \pm 16\%$, $\varepsilon = 10\%$, $\Delta f_{\text{вр}} = 5\%$ и $k_{\text{ап}} = 2,0$

$$I_{\text{нб.рсч max}} = 0,41 I_{\text{к.вн max}}^{(3)} / K_I.$$

Выражение (13.9) определяет *второе условие* выбора тока срабатывания:

$$I_{\text{с.з}} \geq k_{\text{отс}} K_I I_{\text{нб.рсч max}} = k_{\text{отс}} I_{\text{нб.реч max}1} \quad (13.10)$$

Ток срабатывания принимают наибольшим из двух значений, полученных по условиям (13.3) и (13.10). Если определяющим оказывается условие (13.10), а коэффициент чувствительности получается недостаточным, то используют специальные реле с торможением, например типа ДЗТ. Наибольшие возможности для обеспечения требуемого коэффициента чувствительности имеет дифференциальная защита в комплекте ЯРЭ-2201. Согласно требованиям, коэффициент чувствительности, определяемый при двухфазном коротком замыкании на выводах низшего напряжения трансформатора, должен быть $k_{\text{ч}} \geq 2,0$. Допускается снижение коэффициента чувствительности до значения $k_{\text{ч}} \geq 1,5$.

§ 13.5. СХЕМЫ, ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ И ОБЛАСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Дифференциальные токовые защиты трансформаторов выполняются в виде: дифференциальной токовой отсечки; дифференциальной токовой защиты с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока; дифференциальной токовой защиты с реле, имеющими торможение.

На рис. 13.8 показана полная трехфазная схема соединения трансформаторов тока, используемая при выполнении любой из указанных защит. Недостаток схемы состоит в ее сложности, поэтому на трансформаторах малой и средней мощностей достаточно широко применяется упрощенная схема (рис. 13.9, а) с меньшим количеством трансформаторов тока и реле. Эта схема, как и полная трехфазная, обеспечивает выравнивание вторичных токов в цепях циркуляции при нормальной работе и внешних коротких замыканиях за трансформатором с соединением обмоток Y/Δ . Ток срабатывания выбирается в соответствии с общими положениями, рассмотренными выше (см. § 13.4), однако упрощение защиты приводит к недостаткам, которые проявляются при некоторых повреждениях в защищаемой зоне [19].

Дифференциальная токовая отсечка. Отсечка является наиболее простой из дифференциальных защит трансформаторов. Она выполняется посредством максимальных реле тока $KA1, KA2$, например РТ-40 или РТМ, включаемых непосредственно в дифференциальную цепь схемы без каких-либо промежуточных устройств (рис. 13.9, а). При этом отстройка от бросков тока намагничивания достигается выбором тока срабатывания с учетом собственного времени действия реле РТМ, а в схемах с реле косвенного действия — времени срабатывания реле тока и выходного (промежуточного) реле ($t_{с.р} = 0,04 \dots 0,06$ с). За это время ток намагничивания успевает снизиться, в связи с чем появляется возможность выбирать ток срабатывания защиты не по максимальному значению броска тока, а с учетом его затухания по условию (13.3), принимая $k_{отс} = 3,0 \dots 4,5$. Если трансформаторы тока выбраны так, что их полная погрешность не превышает $\epsilon = 10\%$, то отстройка от броска тока намагничивания обеспечивает также отстройку и от максимального тока небаланса при внешних коротких замыканиях при условии допустимого различия токов в цепях циркуляции.

Достоинством дифференциальной токовой отсечки являются быстроедействие и простота, однако из-за большого тока срабатывания дифференциальная токовая отсечка иногда недостаточно чувствительна, поэтому она применяется на трансформаторах относительно небольшой мощности. При этом отсечка должна обеспечивать необходимую чувствительность при коротких замыканиях на выводах трансформатора.

Дифференциальная токовая защита с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока. Для выполнения защиты используются реле с НТТ типа РНТ-565 (см. § 2.3). Принципиальная схема защиты трансформатора с $TLAT$ в однофазном изображении показана на рис. 13.9, б. Реле РНТ-565 применяются в том случае, если чувствительность токовой отсечки недостаточна или требуются дополнительные устройства для выравнивания токов в схеме с реле косвенного действия. При этом требуемую чувствительность защита имеет обычно на двухобмоточных трансформаторах мощностью менее 25 МВ·А. Расчет параметров защиты начинается с предварительного определения тока срабатывания:

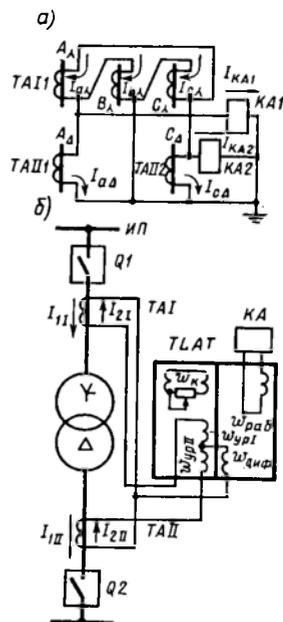


Рис. 13.9. Схема дифференциальной отсечки (а) и дифференциальной токовой защиты двухобмоточного трансформатора с промежуточными насыщающимися трансформаторами тока (б)

по условию (13.3) отстройки от броска тока намагничивания

$$I_{с.з} \geq 1,3 I_{т.ном}; \quad (13.11)$$

по условию (13.10) отстройки от максимального первичного тока небаланса с учетом того, что для защиты с НТТ коэффициент $k_{ан} = 1,0$, а составляющая тока небаланса $\Delta f_{вр}$ в первом приближении не учитывается благодаря соответствующему выбору числа витков уравнивательных обмоток НТТ,

$$I_{с.з} \geq 1,3 \left(\frac{\varepsilon + \Delta U_{пер}}{100} \right) I_{к.нн \max}^{(3)} \quad (13.12)$$

Принимается большее из двух полученных значений тока срабатывания и производится предварительная проверка чувствительности в соответствии с (5.1) (см. § 5.2):

$$k_{ч} = (k_{сх}^{(m)} I_{к \min}^{(m)}) / (k_{сх}^{(3)} I_{с.з}) \geq 1,5. \quad (13.13)$$

Расчетным по чувствительности является двухфазное к.з. на стороне низшего напряжения в минимальном режиме работы питающей системы и при максимальном сопротивлении защищаемого трансформатора. Для дифференциальной защиты трансформатора с соединением обмоток Y/Δ -11 при указанном виде повреждения $k_{сх}^{(m)} = k_{сх}^{(2)} = \sqrt{3}$. Если условие (13.13) обеспечивается, то расчет параметров защиты продолжают. Он сводится к выбору схем соединения трансформаторов тока и их коэффициентов трансформации, определению числа витков дифференциальной $\omega_{диф}$ ($\omega_{раб}$) и уравнивательных $\omega_{урI}$ и $\omega_{урII}$ обмоток исходя из принятого значения тока срабатывания, магнитодвижущей силы срабатывания $F_{с.р}$ и условия полного выравнивания, которое обеспечивается при

$$I_{2I} (\omega_{урI} + \omega_{диф}) = I_{2II} (\omega_{урII} + \omega_{диф}). \quad (13.14)$$

Худшим случаем относительно чувствительности является одностороннее питание при к.з. в зоне ($I_{2II} = 0$). При этом для срабатывания реле ($I_{2I} = I_{с.р}$) необходимо

$$I_{с.р} (\omega_{урI} + \omega_{диф}) = F_{с.р}$$

отсюда

$$\omega_{урI} + \omega_{диф} = F_{с.р} / I_{с.р}, \quad (13.15)$$

где $I_{с.р}$ — ток, А, срабатывания реле, определяемый по $I_{с.з}$ с учетом коэффициента схемы $k_{сх}^{(3)}$ и относящийся к стороне с током I_{2I} .

Из выражения (13.14) находим

$$(\omega_{урII} + \omega_{диф}) = (\omega_{урI} + \omega_{диф}) I_{2I} / I_{2II}. \quad (13.16)$$

С помощью ответвлений от обмоток НТТ подбираются витки дифференциальной и уравнивательных обмоток так, чтобы обеспечи-

вались условия (13.15) и (13.16). Эти условия обеспечиваются и без использования дифференциальной обмотки ($\omega_{\text{диф}}=0$). В общем случае установить расчетное число витков затруднительно. Поэтому появляется дополнительная составляющая тока небаланса $I_{\text{нб. вр}}$. Ее необходимо учесть в окончательном определении тока срабатывания защиты. При этом значения коэффициента отстройки и коэффициента чувствительности должны соответствовать требованиям ПУЭ [3]. При определении $I_{\text{с.р}}$ и числа витков НТТ предварительно выбирают основную сторону защищаемого трансформатора. С учетом этого условия (13.15) и (13.16) можно записать как $\omega_{\text{осн. рсч}}=F_{\text{с.р}}/I_{\text{с.р. осн}}$ и $\omega_{\text{неосн. рсч}}=\omega_{\text{осн. рсч}}I_{2\text{осн}}/I_{2\text{неосн}}$. Изложенный порядок расчета после предварительного выбора тока срабатывания защиты и проверки чувствительности обычно оформляется в виде табл. 13.1.

Таблица 13.1

Наименование величины	Расчетные выражения для сторон	
	высшего напряжения (ВН)	низшего напряжения (НН)
1. Первичный номинальный ток защищаемого трансформатора, А	$I_{1\text{I ном}} = \frac{S_{\text{т. ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{I ном. ср}}}$	$I_{1\text{II ном}} = \frac{S_{\text{т. ном}}}{\sqrt{3} U_{\text{II ном. ср}}}$
2. Схема соединения обмоток защищаемого трансформатора Y/Δ-11	Y	Δ
3. Схема соединения трансформаторов тока	Δ	Y
4. Коэффициент схемы $k_{\text{сх}}^{(3)}$	$\sqrt{3}$	1
5. Коэффициент трансформации трансформаторов тока	$K_{\text{IΔ}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{II ном}}}{5}$	$K_{\text{IY}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{II ном}}}{5}$
6. Вторичный ток в плечах защиты, соответствующий номинальной мощности трансформатора, А	$I_{2\text{I ном}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{II ном}}}{K_{\text{IΔ}}}$	$I_{2\text{II ном}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{II ном}}}{K_{\text{IY}}}$
7. Ток срабатывания реле, А	$I_{\text{с.рI}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{с.зI}}}{K_{\text{IΔ}}}$	$I_{\text{с.рII}} = \frac{k_{\text{сх}}^{(3)} I_{\text{с.зII}}}{K_{\text{IY}}}$
8. Расчетное число витков обмотки НТТ реле для основной стороны защищаемого трансформатора; обычно за основную сторону принимается сторона с большим током срабатывания $I_{\text{с.р.осн}}$ ($I_{\text{с.рI}}$ или $I_{\text{с.рII}}$)	$\omega_{\text{осн. рсч}}=F_{\text{с.р}}/I_{\text{с.р.осн}}, F_{\text{с.р}}=100 \text{ А}$	

Наименование величины	Расчетные выражения для сторон	
	высшего напряжения (ВН)	нижнего напряжения (НН)
9. Предварительно принятое число витков для основной стороны	$\omega_{осн}$ — принимается ближайшее меньшее число витков по отношению к $\omega_{осн.р\check{c}ч}$	
10. Расчетное число витков НТТ реле для неосновной стороны	$\omega_{неосн.р\check{c}ч} = \omega_{осн} I_{2осн.ном} / I_{2неосн.ном}$, здесь токи взяты из п. 6 с учетом того, какая из сторон трансформатора принята за основную	
11. Предварительно принятое число витков обмотки НТТ реле для неосновной стороны	$\omega_{неосн}$ — принимается ближайшее целое число	
12. Составляющая первичного тока небаланса $I_{нб.вр1}$, обусловленная округлением расчетного числа витков неосновной стороны, А	$I_{нб.вр1} = \frac{\Delta f_{в.р}}{100} I_{к.вн\ max}^{(3)} =$ $= \frac{\omega_{неосн.р\check{c}ч} - \omega_{неосн}}{\omega_{неосн.р\check{c}ч}} I_{к.вн\ max}^{(3)}$ $\left(\frac{\varepsilon + \Delta U_{рег}}{100} \right) I_{к.вн\ max}^{(3)} + I_{нб.вр1}$	
13. Первичный расчетный ток небаланса $I_{нб.р\check{c}ч\ max1}$ с учетом составляющей $I_{нб.вр1}$, А	$I_{с.р.осн} = F_{с.р} / \omega_{осн.}$	
14. Уточненное значение тока срабатывания реле на основной стороне, А	$I_{с.з} = I_{с.р.осн} K_{лосн} / k_{сх}^{(3)}$, здесь $K_{лосн}$ может быть или $K_{I\Delta}$, или K_{IY} , а $k_{сх}^{(3)}$ — или $\sqrt{3}$, или 1 в зависимости от того, какая из сторон принята за основную	
15. Уточненное значение тока срабатывания защиты на основной стороне, А	$k_{отс} = I_{с.з} / I_{нб.р\check{c}ч\ max1}$	
16. Действительное значение коэффициента отстройки		

Действительный коэффициент отстройки должен быть не менее 1,3. Если $k_{отс} < 1,3$, то следует принять для основной стороны новое число витков $\omega_{осн}$, меньше по отношению к принявшемуся ранее (см. п. 9). Затем повторить расчет по п. 10—16. Расчет повторяется до тех пор, пока действительный коэффициент отстройки не окажется примерно равным или большим 1,3. Для окончательно выбранного тока срабатывания защиты определяется значение коэффициента чувствительности. Он должен удовлетворять условию (13.13).

В ряде случаев, особенно при наличии встроенного регулирования напряжения под нагрузкой и на трансформаторах с числом групп трансформаторов тока более двух, имеющих источники питания с нескольких сторон, определяющим при выборе тока срабатывания является отстройка от максимального тока небаланса при внешних коротких замыканиях. При этом чувствительность защиты с реле РНТ может оказаться недостаточной. В таких случаях дифференциальная защита выполняется посредством реле с торможением.

Дифференциальная токовая защита на основе реле с магнитным торможением. В нашей стране для дифференциальной защиты трансформаторов выпускаются реле с магнитным торможением типа ДЗТ (см. § 2.3). На рис. 13.10, а показана принципиальная схема защиты в однофазном исполнении в реле ДЗТ-11. Реле ДЗТ-11 имеет одну тормозную обмотку. При выполнении защиты важен выбор стороны, к трансформаторам тока которой целесо-

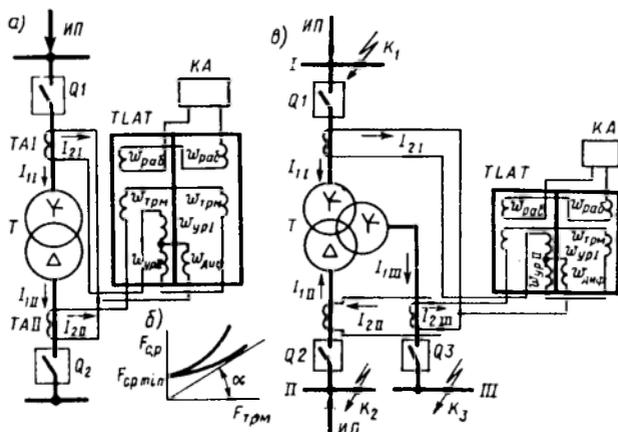


Рис. 13.10. Дифференциальные токовые защиты трансформаторов с магнитным торможением

образно присоединить тормозную обмотку, чтобы обеспечить минимальное торможение при к.з. в зоне защиты и максимальное торможение при внешних повреждениях. Рассматриваемый двухобмоточный трансформатор имеет одностороннее питание, поэтому тормозную обмотку целесообразно присоединить к трансформаторам тока питаемой стороны. Такое включение обеспечивает торможение только при внешних коротких замыканиях. При двустороннем питании иногда целесообразно тормозную обмотку разделить на две секции и включить каждую из них соответственно в первую и вторую цепи циркуляции защиты. Этим уменьшается тормозное действие при коротком замыкании в защищаемой зоне.

На двухобмоточных трансформаторах с расщепленной обмоткой тормозная обмотка включается на сумму токов трансформаторов тока, установленных в цепи каждой из расщепленных обмоток. Ток срабатывания защиты зависит от числа витков и значения тока тормозной обмотки. При отсутствии торможения ($I_{\text{торм}}=0$) ток срабатывания принимает значение минимального тока срабатывания $I_{\text{с.з. min}}$. Ему соответствует минимальная МДС срабатывания $F_{\text{с.р. min}}$, равная 100 А (см. рис. 13.10, б и § 2.3, рис. 2.10, в). Таким образом, для отстройки защиты от бросков тока намагничивания

и от максимальных значений установившегося первичного тока небаланса $I_{нб. рсч\ max1}$ при внешних коротких замыканиях необходимо соответствующим образом выбрать минимальный ток срабатывания защиты $I_{с. з\ min}$ и число витков тормозной обмотки $\omega_{трм}$. Отстройка от бросков тока намагничивания, когда ток в тормозной обмотке отсутствует, достигается выбором тока $I_{с. з\ min}$ по условию (13.3). При этом коэффициент отстройки $k_{отс}$ принимается равным 1,5, так как реле ДЗТ-11 имеет худшие, чем реле РНТ, параметры в отношении отстройки от неустановившихся токов из-за отсутствия в НТТ реле короткозамкнутой обмотки. Далее расчет витков НТТ реле $\omega_{осн}$ и $\omega_{неосн}$ и максимального первичного тока небаланса $I_{нб. рсч\ max1}$ выполняется, как и для реле РНТ, в соответствии с табл. 13.1. Дополнением к этому расчету является выбор числа витков тормозной обмотки $\omega_{трм}$, обеспечивающих отстройку от $I_{нб. рсч\ max1}$. Характеристики реле ДЗТ-11 представляют зависимость $F_{раб} = f(F_{трм})$, где $F_{раб} = I_{раб}\omega_{раб}$, а $F_{трм} = I_{трм}\omega_{трм}$. Из рис. 13.10, б для условия срабатывания $F_{с. р}/F_{трм} = \text{tg } \alpha$. При внешних коротких замыканиях несрабатывание защиты будет обеспечено, если удовлетворится условие

$$\text{tg } \alpha \geq k_{отс} F_{раб}/F_{трм} = k_{отс} (I_{раб}/I_{трм}) (\omega_{раб}/\omega_{трм}). \quad (13.17)$$

Отношение $I_{раб}/I_{трм}$ равно отношению соответствующих первичных токов $I_{раб1}/I_{трм1}$. При внешних коротких замыканиях $I_{раб1} = I_{нб. рсч\ max1}$, а первичный тормозной ток $I_{трм1}$ равен результирующему току, проходящему по первичным обмоткам трансформаторов тока, к которым присоединена тормозная обмотка. Для двухобмоточного трансформатора $I_{трм1} = I^{(3)}_{к. вн\ max}$. Из (13.17) с учетом сказанного

$$\omega_{трм} \geq k_{отс} I_{нб. рсч\ max1} \omega_{раб} / (I^{(3)}_{к. вн\ max} \text{tg } \alpha), \quad (13.18)$$

где $k_{отс} = 1,5$; $\omega_{раб}$ — число витков обмотки НТТ реле на стороне, к которой присоединена тормозная обмотка, при этом учитываются принятое число витков $\omega_{осн}$, если рассматриваемая сторона является основной, и принятое число витков $\omega_{неосн}$, если рассматриваемая сторона является неосновной; $\text{tg } \alpha$ — тангенс угла наклона к оси абсцисс касательной, проведенной из начала координат к характеристике срабатывания реле, соответствующей минимальному торможению (нижняя характеристика на рис. 13.10, б); для реле ДЗТ-11 $\text{tg } \alpha = 0,75$.

На защищаемых трансформаторах с числом групп трансформаторов тока более двух, имеющих источники питания с нескольких сторон (рис. 13.10, в), токи небаланса имеют, как правило, большие значения, чем для двухобмоточных трансформаторов. Обычно токи $I_{нб. рсч}$ при коротких замыканиях с разных сторон (точки K_1 , K_2 , K_3) не одинаковы. Поэтому при использовании реле ДЗТ-11 его тормозная обмотка включается в ту цепь защиты, в которой при внешнем коротком замыкании проходит ток, обуславливающий наи-

больший ток небаланса. В некоторых случаях при недостаточной чувствительности возникает необходимость применять реле с несколькими тормозными обмотками, например ДЗТ-13.

При выборе тока срабатывания защиты определяющими являются те же условия, по которым определяется ток срабатывания защиты двухобмоточных трансформаторов. При этом для упрощения одна из обмоток защищаемого трансформатора, например на стороне III, предполагается отключенной и расчет производится, как для двухобмоточного трансформатора. Затем выполняется расчет, когда отключена обмотка на стороне II. При этом выбранные в предыдущем расчете параметры защиты, относящиеся к обмотке на стороне I, должны оставаться неизменными. Во всех случаях токи I_{II} , I_{III} , I_{III} определяются по соответствующим номинальным напряжениям и номинальной мощности трансформатора вне зависимости от мощности отдельных его обмоток.

Дифференциальная токовая защита с торможением в комплексе устройства ЯРЭ-2201. В защите используется реле с торможением, выполненное на микроэлектронной элементной базе. Схема и принцип действия реле рассмотрены в § 3.5. Это реле обеспечивает более высокую чувствительность защиты, нежели реле ДЗТ. Отстройка защиты от бросков тока намагничивания осуществляется, как и у защиты с ДЗТ, выбором минимального тока срабатывания по условию (13.3) при коэффициенте отстройки $k_{отс} = 0,3 \dots 0,7$. Отстройка от максимальных значений установленного первичного тока небаланса $I_{нб. рсч\ max\ I}$ при внешних коротких замыканиях достигается выбором соответствующего коэффициента торможения $k_{трм}$. В этом случае ток срабатывания защиты благодаря торможению должен быть $I_{с.з} = k_{отс} I_{нб. рсч\ max\ I}$. Значение коэффициента $k_{отс}$ принимается равным 1,2—1,3. Торможение создается тормозным током $I_{трм}$, который при внешних коротких замыканиях равен $I_{к. вн\ max}^{(3)}/K_I$. Из защитной характеристики реле (см. § 3.5, рис. 3.38, в) коэффициент торможения

$$k_{трм} = (I_{с.р} - I_{с.р\ min}) / (I_{трм} - 0,8 I_{т. ном}).$$

Пренебрегая наличием $I_{с.р\ min}$ и $0,8 I_{т. ном}$, с некоторым запасом получим $k_{трм} = I_{с.р} / I_{трм}$. Отношение токов в реле $I_{с.р} / I_{трм}$ равно отношению соответствующих первичных токов $I_{с.з} / I_{к. вн\ max}^{(3)}$. Из (13.9) максимальный первичный ток небаланса

$$I_{нб. рсч\ max\ I} = [(k_{ан} \epsilon + \Delta U_{рег} + \Delta f_{вр}) / 100] I_{к. вн\ max}^{(3)}$$

Из сказанного следует

$$k_{трм} = k_{отс} (k_{ан} \epsilon + \Delta U_{рег} + \Delta f_{вр}) / 100. \quad (13.19)$$

При $k_{отс} = 1,3$, $k_{ан} = 2$, $\epsilon = 10\%$, $\Delta U_{рег} = \pm 16\%$, $\Delta f_{вр} = 5\%$ коэффициент торможения $k_{трм} = 0,533$.

Имеется возможность устанавливать на реле коэффициент торможения равным 0,3, 0,45, 0,6. Уставка минимального тока срабатывания реле изменяется дискретно и составляет 2, 2,5, 3,25, 4,5 и 6 А.

Общая оценка дифференциальных защит трансформаторов. Дифференциальные защиты обеспечивают быстрое и селективное отключение повреждений в зоне, охватываемой трансформаторами тока. Рекомендуется применять дифференциальную защиту на одиночно работающих трансформаторах мощностью $P_T \geq 6,3$ МВ·А и на трансформаторах мощностью $P_T \geq 4$ МВ·А, работающих параллельно. Дифференциальная защита устанавливается также на трансформаторах мощностью $P_T = 1 \dots 4$ МВ·А в том случае, если: токовая отсечка не удовлетворяет требованиям чувствительности, а максимальная токовая защита имеет выдержку времени $t_{с.з} > 0,5$ с; трансформатор установлен в районе, подверженном землетрясениям.

При выборе схемы дифференциальной защиты необходимо прежде всего рассмотреть возможность применения наиболее простой из дифференциальных защит — дифференциальной токовой отсечки. Только в случае ее недостаточной чувствительности следует использовать реле РНТ. Защиты с реле, имеющими торможение, наиболее сложны, и их применение оправдано только невозможностью отстройки защиты без торможения от установившихся значений максимального тока небаланса при внешних коротких замыканиях.

Дифференциальная токовая защита имеет тот недостаток, что может отказать из-за недостаточной чувствительности при внутренних коротких замыканиях, например витковых. Это вызывает необходимость устанавливать наряду с дифференциальной и газовую защиту.

§ 13.6. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРА ОТ СВЕРХТОКОВ ВНЕШНИХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ И ПЕРЕГРУЗОК

На трансформаторах наряду с защитами, действующими при повреждении в трансформаторе и его соединениях, предусматриваются резервные защиты для действия при внешних коротких замыканиях в случае отказа защит или выключателей смежных элементов. Одновременно они являются основными защитами шин, на которые работает трансформатор, если на шинах отсутствует собственная защита. В качестве защит от внешних коротких замыканий применяются токовые защиты с выдержкой времени с включением реле на полные токи фаз и на их симметричные составляющие. Эти защиты реагируют и на внутренние короткие замыкания, поэтому могут использоваться как резервные или даже как основные защиты трансформаторов.

Токовая защита от сверхтоков внешних многофазных коротких замыканий. В соответствии с [3] на трансформаторах мощностью менее 1 МВ·А предусматривается максимальная токовая защита, действующая на отключение. Она же вместе с токовой отсечкой является основной защитой трансформатора (см. § 13.3). На трансформаторах мощностью более 1 МВ·А должна быть предусмотрена максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения или токовая защита обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных к. з.

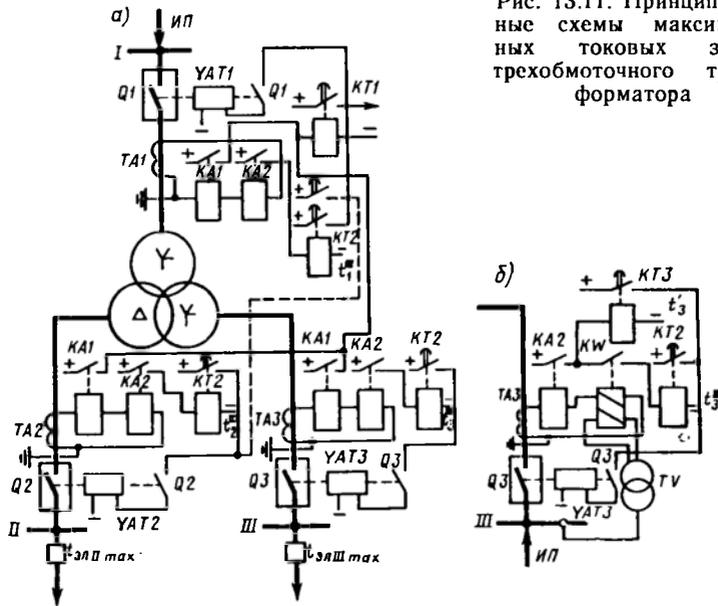


Рис. 13.11. Принципиальные схемы максимальных токовых защит трехобмоточного трансформатора

Максимальная токовая защита. Схемы максимальной токовой защиты трансформатора выполняются аналогично схемам третьей ступени защиты со ступенчатой характеристикой выдержки времени, описанным выше (см. § 13.3). Параметры рассчитывают аналогично.

На многообмоточных трансформаторах максимальная токовая защита должна обеспечить отключение только того выключателя, со стороны которого происходит короткое замыкание. На трехобмоточном трансформаторе с односторонним питанием это достигается путем установки отдельных защит с каждой стороны (рис. 13.11, а, реле $KA2$, $KT2$) и соблюдения следующего порядка при выборе выдержек времени: $t_2^{III} = t_{эл II \max} + \Delta t$; $t_3^{III} = t_{эл III \max} = \Delta t$; $t_1^{III} \geq t_2^{III} + \Delta t$ или $t_1^{III} \geq t_3^{III} + \Delta t$ (выбирается большее значение). Аналогичным способом выполняется защита и на двухобмоточных

трансформаторах с расщепленными обмотками и односторонним питанием.

На рис. 13.11, *a* каждая защита действует на отключение выключателя соответствующей стороны. Обычно схема выполняется так, что защита со стороны питания воздействует на выходное (промежуточное) реле, общее для всех основных защит трансформатора, и отключает все его выключатели. В целях упрощения допускается не устанавливать защиты на одной из питаемых сторон, например *II*, при этом со стороны питания защита имеет две выдержки времени: с меньшей из них (t_2^{III}) она действует на отключение выключателя той стороны, где защита отсутствует (показано пунктиром на рис. 13.11, *a*), а с большей (t_1^{III}) — на выходное реле (на схеме не показано).

Для получения минимально возможных выдержек времени t_2^{III} и t_1^{III} защита не устанавливается с той из питаемых сторон, где отходящие элементы имеют защиты с большей расчетной выдержкой времени, например $t_{эл II \max} > t_{эл III \max}$. При этом $t_3^{III} = t_{эл III \max} + \Delta t$; $t_2^{III} = t_{эл II \max} + \Delta t$ или $t_2^{III} \geq t_3^{III} + \Delta t$ (выбирается большее значение) и $t_1^{III} = t_2^{III} + \Delta t$.

На многообмоточных трансформаторах при питании с нескольких сторон, а также на двухобмоточных трансформаторах с двусторонним питанием рассмотренная максимальная токовая защита не обеспечивает селективного отключения. Для получения селективности одну из защит со стороны питания, например *III*, необходимо выполнить направленной (рис. 13.11, *b*). Орган направления мощности *KW* разрешает ей действовать на отключение с выдержкой времени t_3^{III} реле *KT2* только при внешних коротких замыканиях, как и в случае одностороннего питания, поэтому порядок выбора выдержек времени $t_1^{III} - t_3^{III}$ остается прежним. При повреждениях в трансформаторе защита действует по обходной (для реле направления мощности) цепи с выдержкой времени $t_3' > t_1^{III}$ реле *KT3*.

Максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения. Схема защиты рассмотрена выше (см. § 12.4, рис. 12.6). Наличие комбинированного пускового органа напряжения позволяет выбрать ток срабатывания защиты без учета перегрузки трансформатора по условию

$$I_{с.з}^{III} = k_{отс}^{III} I_{т.ном} / k_B, \quad (13.20)$$

где $k_{отс}^{III}$ принимается равным 1,2, а $k_B = 0,8$.

Напряжение срабатывания защиты определяется по следующим условиям: для минимального реле напряжения, включенного на междуфазное напряжение, исходя из обеспечения возврата реле в условиях самозапуска после отключения внешнего короткого замыкания — по выражению

$$U_{с.з} \leq U_{\text{раб м'п}} / (k_{\text{отс}} k_{\text{в}}); \quad (13.21)$$

отстройки от напряжения самозапуска $U_{\text{сзп}}$ при включении от УАПВ или УАВР заторможенных двигателей нагрузки — по выражению

$$U_{с.з} \leq U_{\text{сзп}} / k_{\text{отс}}. \quad (13.22)$$

В ориентировочных расчетах напряжение $U_{\text{раб м'п}}$ принимают равным $(0,9 \dots 0,85) U_{\text{ном}}$, а напряжение $U_{\text{сзп}}$ — равным примерно $0,7 U_{\text{ном}}$. Коэффициент отстройки $k_{\text{отс}}$ и коэффициент возврата $k_{\text{в}}$ рекомендуется принимать равными 1,2.

Для реле напряжения обратной последовательности, как и в защите генератора, напряжение срабатывания принимают равным 6 В. Защита должна иметь требуемую чувствительность по току и по напряжению (см. § 12.4).

Токовая защита обратной последовательности с приставкой для действия при симметричных повреждениях. Приставка для действия при симметричных к.з. состоит из одного реле тока и одного минимального реле напряжения (см. § 12.4, рис. 12.7). Для выбора тока срабатывания реле тока используется выражение (13.20), а напряжение срабатывания минимального реле напряжения определяется с учетом выполнения условий (13.21) и (13.22). Для защиты обратной последовательности ток срабатывания $I_{с.з 2}^{\text{III}}$ выбирается, как и для защиты генератора (см. § 12.4), по условию отстройки от тока, содержащего максимально допустимый ток несимметрии $I_{2\text{доп}}$ и ток небаланса $I_{\text{нб}}$ на выходе фильтра, приведенный к первичной стороне трансформаторов тока защиты в расчетном режиме перегрузки:

$$I_{с.з 2}^{\text{III}} \geq k_{\text{отс}}^{\text{III}} (I_{\text{нб}} + I_{2\text{доп}}) / k_{\text{в}}. \quad (13.23)$$

Рекомендуется также согласовывать чувствительность с токовыми защитами обратной последовательности, установленными на смежных элементах. Если такая защита отсутствует, то согласование производится с токовой защитой нулевой последовательности в сетях с глухозаземленными нейтральными, с защитами от многофазных к.з. На трехобмоточных трансформаторах максимальная токовая защита с комбинированным пусковым органом напряжения и токовая защита обратной последовательности с приставкой от симметричных к.з., как и обычная максимальная токовая защита, устанавливаются со всех трех или только с двух сторон. На одной из сторон защита иногда выполняется направленной при наличии двух- или трехстороннего питания. Выдержки времени защит выбираются, как и у максимальной токовой защиты.

Токовая защита нулевой последовательности для повышающих трансформаторов. Если повышающий трансформатор со стороны высшего напряжения имеет глухозаземленную нейтраль, то возникает необходимость защищать трансформатор от внешних коротких

замыканий на землю. Токовая защита обратной последовательности реагирует на этот вид повреждения. Однако в большинстве случаев ее чувствительность бывает недостаточной и трансформатор снабжается специальной токовой защитой нулевой последовательности. Защита состоит из одного реле тока KAZ , подключенного к трехтрансформаторному ($TA1—TA3$) фильтру тока нулевой последовательности, установленному на стороне высшего напряжения (рис. 13.12, а).

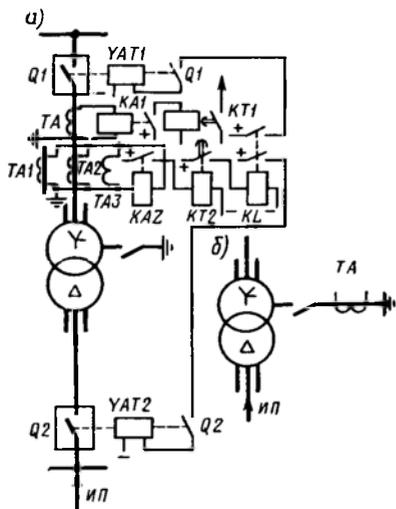


Рис. 13.12. Принципиальная схема токовой защиты нулевой последовательности от внешних коротких замыканий на землю

Реле времени $KT2$ создает необходимую выдержку времени. Для выполнения защиты можно использовать однострансформаторный фильтр в виде трансформатора тока TA , установленного в цепи заземленной нейтрали защищаемого трансформатора (рис. 13.12, б). В этом случае в зону защиты входит и обмотка трансформатора, соединенная в звезду, независимо от наличия в системе других заземленных нейтралей.

Выдержка времени защиты выбирается на ступень селективности больше, чем время срабатывания защит от коротких замыканий на землю смежных элементов ($t_{III_{с.з}} = t_{эл\ max} + \Delta t$), а ток срабатывания согласуется с ними по чувствительности и отстраивается от тока небаланса при внешних коротких замыканиях. Обычно принимают $I_{III_{с.з}} \approx (0,4 \dots 0,8) I_{T.ном}$. Если опре-

деляющим при выборе тока срабатывания является отстройка от тока небаланса, то при недостаточной чувствительности целесообразно защиту выполнять с выдержкой времени большей, чем время действия защит от многофазных повреждений смежных элементов. Это дает возможность отстраивать ток срабатывания только от тока небаланса при нормальной работе. Токовая защита нулевой последовательности предусматривается на повышающих трансформаторах мощностью $P_T = 1000$ кВ·А и более с глухозаземленной нейтралью [3].

Токовая защита от перегрузок. Перегрузка обычно является симметричной, поэтому защита от перегрузки выполняется одним реле тока KAI , включенным в цепь одного из трансформаторов тока защиты от внешних коротких замыканий (рис. 13.11, а). Ток срабатывания реле определяется по выражению $I_{с.р} = (k_{отс}/k_B) (I_{T.ном}/K_I)$. Коэффициент $k_{отс}$ учитывает только погрешность в токе срабатывания и принимается равным $k_{отс} = 1,05$. Для отстройки от

кратковременных перегрузок и коротких замыканий предусматривается реле времени $KT1$, рассчитанное на длительное прохождение тока в его обмотках. Выдержка времени принимается на ступень селективности больше, чем время срабатывания защиты трансформатора от внешних коротких замыканий.

На трехобмоточных трансформаторах с обмотками равной мощности и односторонним питанием защита от перегрузки устанавливается только со стороны питания. Если обмотки имеют разную мощность, то дополнительно устанавливается защита на питаемой обмотке меньшей мощности. При возможности передачи мощности в любых направлениях защита от перегрузки устанавливается со всех сторон (см. рис. 13.11, *a*, реле $KA1$, $KT1$). Защита от перегрузки предусматривается при параллельной работе нескольких трансформаторов мощностью по 400 кВ·А и более, а также при отдельной работе и наличии УАВР с действием на сигнал, автоматическую разгрузку или отключение [3].

Рассмотренная защита от перегрузок не позволяет полностью использовать перегрузочную способность трансформатора. Наиболее объективным критерием перегрузки является не ток, а температура изоляции обмотки трансформатора. На основе разработок Рижского политехнического института [112] созданы температурные реле с токовой коррекцией. Реле контролирует температуру изоляции с учетом температуры окружающей среды (масла) и нагрузки трансформатора до появления перегрузки. Температура масла контролируется непосредственно с помощью измерительного преобразователя (датчика) температуры, а температура изоляции обмоток — косвенно электрическим моделированием. Реле рекомендуется применять на двухтрансформаторных подстанциях, где при аварийном отключении одного трансформатора возникают послеаварийные перегрузки оставшегося в работе трансформатора.

§ 13.7. ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРА ОТКРЫТЫМИ ПЛАВКИМИ ВСТАВКАМИ И ПЛАВКИМИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

В сетях напряжением 6 (10) и 35 кВ довольно часто вместо выключателя и релейной защиты со стороны высшего напряжения трансформатора устанавливают открытые плавкие вставки или плавкие предохранители. Рассмотрим выбор их параметров как устройств защиты трансформатора.

Открытые плавкие вставки. Они выполняют функции защиты, короткозамыкателя и отделителя. Это обеспечивается тем, что при перегорании плавкой вставки в любой из фаз в сетях с глухозаземленными нейтралью возникает однофазное короткое замыкание, а в сетях с изолированной нейтралью — двухфазное короткое замыкание. Эти повреждения, как и при действии короткозамыкателя, вызывают срабатывание защиты питающей линии с последующим ее АПВ. В [113] даны защитная характеристика и эмпири-

ческая зависимость между номинальными токами открытой плавкой вставки $I_{вс.ном}$ (А) и ее сечением $F_{вс}$ (мм²). Для выбора сечения обычно бывают заданы: номинальная мощность трансформатора $S_{т.ном}$ (МВ·А), номинальные напряжения $U_{т.ном}$ (кВ), сопротивление трансформатора X_t , максимальная мощность трехфазного короткого замыкания на стороне высшего напряжения S_k (МВ·А), минимальное $t_{пр min}$ и максимальное $t_{пр max}$ время плавления плавкой вставки по условию согласования с защитами входящих и питающих линий соответственно. Рекомендуемый графоаналитический метод выбора плавкой вставки предполагает пять вычислительных операций и двойное использование защитной характеристики. При этом неизбежны определенные погрешности, появляющиеся при пользовании характеристикой. В связи с этим представляет практический интерес выбор сечения плавкой вставки аналитическим методом без промежуточных расчетов и использования защитной характеристики. В [82] показано, что сечение алюминиевой открытой плавкой вставки должно удовлетворять следующему условию:

$$\frac{\sqrt{t_{пр min}} S_k}{0,29 U_{т.ном} (1 + X_t S_k / S_{т.ном})} < F_{вс} < \frac{\sqrt{t_{пр max}} S_k}{0,33 U_{т.ном}} \quad (13.24)$$

Плавкие предохранители. В сетях напряжением 35 кВ для защиты трансформаторов применяются выхлопные предохранители ПВТ-35-100-3,2У1 (см. § 4.2). Выхлопные предохранители выпускаются также для сетей напряжением 10 и 110 кВ. Однако использование предохранителей в сетях напряжением 110 кВ недостаточно обосновано. В сетях же напряжением 6 (10) кВ наибольшее применение получили предохранители типа ПКТ (см. § 4.2). Обычно они устанавливаются вместе с выключателем нагрузки типа ВНП. При этом трансформатор отключается и включается выключателем нагрузки, а предохранитель выполняет функции токовой защиты и коммутационного аппарата при отключении поврежденного трансформатора. При внутренних витковых повреждениях токи, проходящие по предохранителю, обычно недостаточны для его срабатывания. Выключатель нагрузки способен коммутировать такие токи, поэтому при наличии на трансформаторе газовой защиты, срабатывающей при витковых замыканиях, ее целесообразно выполнить с действием не на сигнал, а на отключение выключателя нагрузки. При многофазных к. з. защита должна действовать только на сигнал. Применение предохранителей значительно удешевляет установку. Однако из-за старения плавких вставок и по другим причинам их защитные характеристики нестабильны, кроме того, они отличаются от характеристик релейной защиты смежных с трансформатором элементов. Все это затрудняет, а в ряде случаев исключает возможность добиться селективности действия предохранителей.

Обзор литературы обнаруживает отсутствие четких представлений об области применения плавких предохранителей. В одном случае утверждается, что в сетях напряжением 35 кВ плавкие предохранители могут защитить трансформатор мощностью до 6,3 МВ·А [42], во втором она определяется равной 4 МВ·А [114], а в третьем говорится о непригодности предохранителя даже для защиты трансформатора мощностью 2,5 МВ·А [115]. Такие противоречивые утверждения вызваны неполным учетом требований, которым должны удовлетворять предохранители. Для предотвращения срабатывания предохранителя в нормальном режиме и при бросках тока намагничивания трансформатора плавкую вставку предохранителя выбирают с номинальным током

$$I_{\text{вс.ном}} \approx (1,5 \dots 2) I_{\text{т.ном}} \quad (13.25)$$

Однако условие (13.25) недостаточно для обеспечения надежной защиты трансформатора и исключения неселективных действий предохранителя. Плавкую вставку следует выбирать также с учетом обеспечения термической стойкости и допустимой эксплуатационной и аварийной перегрузки трансформатора; селективного действия предохранителя F с защитами линий, отходящими от шин низшего напряжения (защита $A1$ на рис. 13.13, a); селективного действия предохранителя F с защитами $A2$ питающей линии.

Обеспечение термической стойкости. Согласно ГОСТ 11687—75*, для масляных трансформаторов с медными и алюминиевыми обмотками допустимая длительность прохождения тока при повреждении за трансформатором (c) $t_{\text{доп}} \leq 1500/k^2$ (но не более 4 с для трансформаторов до 35 кВ и ниже и не более 3 с для трансформаторов 110 кВ и выше). Здесь $k = I_{\text{к.вн max}}/I_{\text{т.ном}}$ — отношение максимального тока при внешнем коротком замыкании к номинальному току трансформатора. Для выполнения этого условия полное время отключения трансформатора $t_{\text{пр}}$ не должно превышать времени $t_{\text{доп}}$.

Необходимо иметь в виду, что термическая стойкость трансформатора, защищаемого предохранителем, может быть не обеспечена при неполнофазных режимах, возникающих, например, при двухфазных коротких замыканиях за трансформаторами.

Обеспечение допустимой аварийной и эксплуатационной перегрузки. В аварийных режимах допускается перегрузка масляных трансформаторов до 40% сверх номинального тока общей продолжительностью не более 6 ч в сутки в течение 5 сут [116]. Это условие определяет низший предел выбора номинального тока плавкой вставки, т. е. $I_{\text{вс.ном}} \geq 1,4 I_{\text{т.ном}}$. При этом обеспечивается также допустимая эксплуатационная перегрузка трансформаторов.

Обеспечение селективного действия предохранителя с защитами линий, отходящими от шин низшего напряжения. В общем случае согласование защитной

характеристики предохранителя с защитами отходящих линий приходится выполнять для двух режимов: трехфазного короткого замыкания на шинах низшего напряжения (точка K_1 на рис. 13.13, а) и перегрузки. В случае короткого замыкания селективность должна обеспечиваться при максимальном токе $I_{к,вн\max}^{(3)}$. Учитывая разброс защитной характеристики по току и необходимый запас, ток плавкой вставки, при котором производят согласование, определяют с учетом коэффициента отстройки $k_{отс} = 1,3$, т. е. $I_{вс} = = 1,3I_{к,вн\max}^{(3)}$. При этом токе плавкая вставка должна перегореть за время $t_{пр} \geq (t_{с,з1} + \Delta t_1)$, где $t_{с,з1}$ — выдержка времени защиты $A1$ при токе $I_{к,вн\max}^{(3)}$; Δt_1 — ступень селективности, принимаемая равной 0,6—0,7 с.

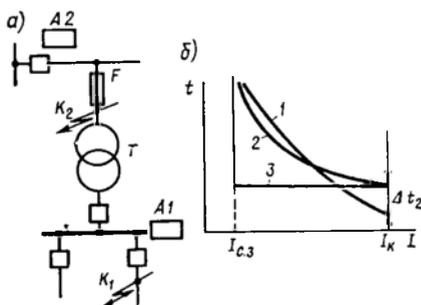


Рис. 13.13. Защита трансформатора плавкими предохранителями

Согласовывая защитную характеристику предохранителя при перегрузках, необходимо учитывать, что через предохранитель кроме тока перегруженной линии проходят токи нагрузки других отходящих от шин линий.

Обеспечение селективного действия предохранителя с защитой питающей линии. Защита питающей линии может выполняться как с зависимой, так и с независимой характеристикой выдержки времени. В том и в другом случае селективность должна сохраняться при изменении тока от значения $I_{с,з2}$ до значения I_k при повреждении на выводах высшего напряжения трансформатора (точка K_2 на рис. 13.13, а). Характеристика защиты или вообще не зависит от тока, или идет более полого, чем защитная характеристика предохранителя. Поэтому если для согласования принять ток I_k , то с уменьшением тока характеристики предохранителя 1 и защит 2, 3 будут сближаться (рис. 13.13, б) и селективность может не обеспечиваться. Очевидно, если достичь селективного действия при токе срабатывания защиты, то с увеличением тока селективность будет обеспечиваться автоматически.

Так как предохранитель и защита имеют разброс по току, то при согласовании обычно принимают $I_{вс} = 0,7 I_{с,з2}$. При таком токе плавкая вставка должна перегореть за время $t_{пр} \leq (t_{с,з2} - \Delta t_2)$, где $t_{с,з2}$ — выдержка времени защиты, соответствующая ее току срабатывания; $\Delta t_2 = 0,5 \dots 0,7$ с — ступень селективности, учитывающая время горения дуги и разброс защиты по времени.

Расчеты показывают [45, 117, 118, 119], что при выборе предохранителей практически невозможно достичь удовлетворения всех указанных требований. Предохранитель, установленный со сторо-

ны высшего напряжения, не защищает трансформатор от перегрузок. Для этого приходится или использовать предохранитель, установленный на стороне низшего напряжения трансформатора, или предусматривать защиту при наличии со стороны выводов низшего напряжения коммутационного аппарата. О неспособности предохранителя защитить трансформатор от перегрузки можно заключить из рассмотрения рис. 13.14, а, на котором построены защитная характеристика стандартного предохранителя ПКТ-10 (кривая 1) и

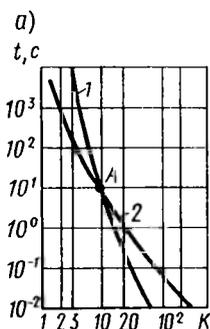
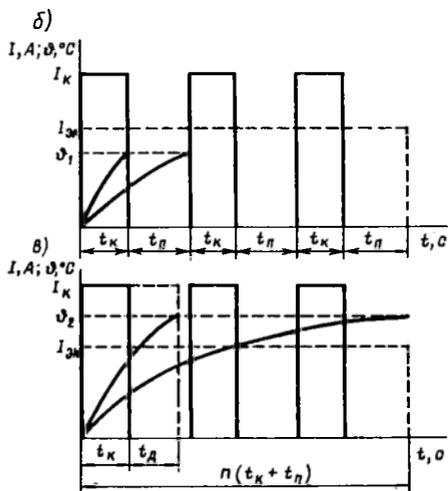


Рис. 13.14. Характеристики предохранителя и термической стойкости трансформатора (а) и изменения тока при многократных неуспешных АПВ (б, в)



характеристика термической стойкости трансформатора (кривая 2) [120]. Построение выполнено для $I_{вс.ном} = 2I_{т.ном}$. При этом кратность перегрузки трансформатора

$$k = I_{пер} / I_{т.ном} = I_{пер} / (0,5 I_{вс.ном}).$$

Характеристики пересекаются в точке А, т. е. при $k \leq 8$ предохранитель не защищает трансформатор. Кроме того, во многих случаях невозможно достичь необходимых селективности и чувствительности. Так, например, невозможно согласовать действие выхлопных предохранителей с максимальной токовой защитой питающей линии 35 кВ. Согласование с токовыми отсечками этой линии обеспечивают предохранители с плавкими вставками на номинальные токи не более 80 А, что соответствует максимальной мощности защищаемого трансформатора, равной 1 МВ·А. При согласовании предохранителей с защитами отходящих от шин низшего напряжения линий их селективное действие обеспечивается, если мощность защищаемого трансформатора не превышает 2,5 МВ·А [119]. В связи с этим как исключение приемлемым считается обес-

печение селективности между предохранителем и защитой питающей линии при коротком замыкании на стороне высшего напряжения трансформатора. Трудности, с которыми приходится иметь дело при выборе плавкой вставки предохранителя, вызваны тем, что к ней предъявляются противоречивые требования. Действительно, для согласования с защитами питающей линии сечение и номинальный ток плавкой вставки следует уменьшать, а для согласования с защитами присоединений, отходящих от шин низшего напряжения, — увеличивать. При наличии на присоединениях устройств АПВ возможность согласования уменьшается, так как приходится учитывать повторные включения на неустраившееся короткое замыкание. Это, в свою очередь, требует дальнейшего увеличения сечения и номинального тока плавкой вставки. Следует, однако, сказать, что до сих пор плавкие вставки выбирают без учета АПВ. Это, безусловно, может приводить к нарушению их селективности. Ниже предлагается одна из возможных методик учета АПВ при выборе плавких вставок.

На рис. 13.14, б показан характер изменения действующего значения тока в плавкой вставке I_k без учета тока нагрузки при многократном неуспешном АПВ. Из рисунка следует, что плавкая вставка работает в повторно-кратковременном режиме. Для этого режима можно найти эквивалентный ток $I_{эк}$, который, проходя по плавкой вставке в течение времени $t_k + t_n$, вызовет тот же ее нагрев ϑ_1 , что и действительный ток I_k в течение времени t_k .

Здесь $t_k = t_{с.э1} + t_{о.в.}$, $t_n = t_{АПВ1} + t_{в.в.}$.

Известно, что установившееся превышение температуры $\vartheta_y = I^2$,

Поэтому

$$I_k^2 (1 - e^{-t_k/T}) = I_{эк}^2 (1 - e^{-(t_k+t_n)/T}),$$

или

$$I_{эк} = I_k \sqrt{(1 - e^{-t_k/T}) / (1 - e^{-(t_k+t_n)/T})}.$$

При известном значении постоянной времени нагрева плавкой вставки T можно определить $I_{эк}$ и далее для соответствующего $t_{эк} = n(t_k + t_n)$ выбрать по защитным характеристикам номинальный ток плавкой вставки. Коэффициент $n = k_{АПВ} + 1$, где $k_{АПВ}$ — кратность АПВ.

Влияние АПВ на выбор номинального тока плавкой вставки можно учесть иначе. Для этого необходимо найти суммарное время $t_{\Sigma} = t_k + t_d$, в течение которого ток I_k нагреет плавкую вставку так же, как и в повторно-кратковременном режиме при неуспешном многократном АПВ. Такой же нагрев вызывает ток $I_{эк}$ за время $n(t_k + t_n)$ (рис. 13.14, в). Поэтому

$$I_k^2 (1 - e^{-n(t_k+t_n)/T}) = I_{эк}^2 (1 - e^{-(t_k+t_d)/T}).$$

Используя полученное выше соотношение между I_k и $I_{эк}$ и производя преобразования, окончательно получим

$$t_d = T \ln \frac{(1 - e^{-(t_k+t_n)/T}) - (1 - e^{-t_k/T})(1 - e^{n(t_k+t_n)/T})}{e^{-t_k/T} (1 - e^{-(t_k+t_n)/T})}.$$

Дополнительное время t_d при прочих равных условиях увеличивается с увеличением кратности АПВ и может в зависимости от соотношения t_k и t_n достигать или даже превышать t_k . Так, например, при $t_k = 0,2$ с, $t_n = 0,8$ с, $T = 3$ с дополнительное время $t_d = 0,15$ с при $n = 2$ и $t_d = 0,27$ с при $n = 3$. Для опреде-

ления t_d необходимо знать значение постоянной времени нагрева плавкой вставки T . Поэтому наряду с другими характеристиками предохранителей и плавких вставок заводом — изготовителем должны быть указаны и значения постоянной времени нагрева T для каждой плавкой вставки.

В последние годы у нас в стране предприняты попытки разработать плавкие вставки для выхлопных предохранителей с целью расширения области их применения. Характеристики этих плавких вставок рассмотрены в § 4.2. Новые плавкие вставки также не полностью удовлетворяют перечисленным выше требованиям. Разработаны они без должного обоснования шкалы номинальных токов и защитных характеристик. В конце 1981 г. Международная электротехническая комиссия (МЭК) предложила проект стандартизации защитных характеристик плавких вставок предохранителей для цепей, содержащих трансформаторы. Этим проектом предусматривается необходимость согласования защитных характеристик с защитами смежных с трансформатором элементов, а также отстройки от бросков тока намагничивания трансформаторов. Предохранитель должен разрешать допустимую перегрузку трансформатора и обеспечивать его термическую стойкость.

Для обеспечения этих требований рекомендуется иметь защитную характеристику такой, чтобы при времени плавления 10 с ток плавления не превышал шестикратного номинального тока плавкой вставки, а при времени плавления 0,1 с ток плавления был не менее 10—12-кратного значения номинального тока трансформатора. Таким образом, в проекте МЭК конкретно указаны только две точки защитной характеристики. При этом обеспечиваются только защита трансформаторов от коротких замыканий и отстройка от бросков тока намагничивания.

Безусловно, защитная характеристика плавкой вставки определяется не только самим защищаемым трансформатором, но и местом его подключения, уровнем токов короткого замыкания, параметрами защит, с которыми согласуется характеристика, и рядом других причин. Можно лишь предположить, что защитные характеристики плавких вставок предохранителей 35 и 110 кВ будут неодинаковыми. В общем случае они отличаются и от характеристик зарубежных плавких вставок. Из этого следует, что рекомендации МЭК оказываются недостаточными для разработки плавких вставок. Поэтому задача состоит в том, чтобы исходя из требований селективности, чувствительности и быстродействию определить желательную защитную характеристику и оценить принципиальную возможность плавкой вставки с такой характеристикой. В [119] получены и обоснованы защитные характеристики плавких вставок для защиты трансформаторов 10 и 35 кВ. При этом обнаружена принципиальная возможность изготовить плавкие вставки с требуемыми защитными характеристиками для трансформаторов 35 кВ мощностью не более 1,6 МВ·А. Для трансформаторов большей мощности расчетная защитная характеристика приобретает вид,

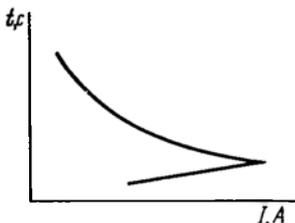


Рис. 13.15. Расчетная защитная характеристика плавкой вставки для защиты трансформатора напряжением 35 кВ мощностью более 1,6 МВ·А

указанный на рис. 13.15. Такую защитную характеристику получить невозможно. Согласно ПУЭ [3], на трансформаторах мощностью 4—6,3 МВ·А и даже мощностью 1 МВ·А должна предусматриваться дифференциальная защита. Это требование тоже ограничивает область применения плавких предохранителей. Изложенное дает основание сделать вывод о несовершенстве плавких предохранителей как устройств защиты. Требования к ним ограничивают область их применения. Поэтому целесообразно использовать предохранитель как коммутационный аппарат, управляемый устройствами релейной защиты.

§ 13.8. ЗАЩИТА ТРАНСФОРМАТОРОВ УПРАВЛЯЕМЫМИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЯМИ

При разрыве цепи плавкой вставки по сигналу релейной защиты предохранитель становится управляемым и область применения его существенно расширяется. В [48] показано, что в общем случае область применения управляемых предохранителей зависит от мощности защищаемых трансформаторов, схем подстанций и видов устройств релейной защиты, установленных на смежных с трансформатором элементах. При этом у управляемого предохранителя выхлопного типа благодаря расположению электромагнита отключения и источника оперативного тока на высоком потенциале аппарата (см. § 4.3, рис. 4.11) появляется возможность расположить и устройство релейной защиты на высоком потенциале и тем самым отказать от применения дорогостоящих высоковольтных трансформаторов тока на подстанциях без выключателей на стороне высшего напряжения 35 (110) кВ.

В Ульяновском политехническом институте разработана система управления выхлопным предохранителем с трехступенчатой токовой защитой, выполненной на основе операционных усилителей [47]. Эта система дополняется светооптическим устройством передачи сигналов, если требуется отключение предохранителя при действии, например, газовой защиты.

Согласно [3], на трансформаторах мощностью $P_T \geq 6,3$ МВ·А должна предусматриваться дифференциальная защита. При отсутствии трансформаторов тока это требование можно удовлетворить, если использовать управляемый предохранитель со светооптической системой управления. Эта система позволяет согласовать действие токовой защиты, расположенной на высоком потенциале аппарата, с действием защиты, установленной на стороне низшего напряжения трансформатора, и получить защиту трансформатора с косвенным сравнением электрических величин, обладающую абсолютной селективностью [47]. Для защиты трансформатора с высшим напряжением 6(10) кВ можно использовать управляемый предохранитель, выполненный на основе стандартного предохранителя ПКТ.

Одна из возможных конструкций управляемого предохранителя для совместного действия с релейной защитой показана на рис. 13.16, а [45]. Управление осуществляется с помощью трехфазного привода (на рисунке не показан), связанного с режущим механизмом, расположенным в одном из контактных колопцов 1. Режущий механизм состоит из втулки 2 и режущего поворотного вала 3, в котором просверлены отверстия, соответствующие по числу плавким вставкам. Для лучшего перерезания плавкой вставкой в отверстия впрессовываются стальные втулки 4. Наличие привода позволяет газовой защите действовать на отключение. В случае необходимости могут быть установлены и другие защиты.

Выше отмечалось (см. § 13.7), что предохранитель типа ПКТ не защищает трансформатор от перегрузок в связи с тем, что его защитная характеристика 1 при $I_{вс.ном} = 2I_{т.ном}$ пересекает характеристику термической стойкости трансформатора 2 в некоторой точке А (рис. 13.16, б). Защита обеспечивается, если при любой кратности тока k характеристика 1 располагается ниже характеристики 2. Этому требованию удовлетворяет защитная характеристика 3 управляемого предохранителя. Она состоит из двух частей: одна ее часть (ниже точки Б) совпадает с характеристикой стандартного предохранителя и определяется временем перегорания плавкой вставки, а другая (управляемая) — располагается более полого относительно защитной характеристики стандартного предохранителя и пересекает ее при кратности тока, проходящего через трансформатор, $k \approx 30$. Время, соответствующее управляемой части характеристики, складывается из времени отключения самого аппарата и времени гашения дуги.

Таким образом, управляемый предохранитель УПКТ имеет зависимое от тока время отключения. С таким временем отключается трансформатор, если на УПКТ воздействует защита без выдержки времени. На трансформаторе может быть установлена защита как с независимой, так и с зависимой выдержкой времени. При этом в зависимости от установки защитная характеристика устройства смещается вверх так, что точка Б скользит по кривой 1. В пределе, при максимально допустимой выдержке времени защиты точка Б должна совпадать с точкой А, а управляемая часть характеристики — с кривой 2 или располагаться ниже ее. На рис. 13.16, в изображены защитные характеристики 1—4 устройства при различных выдержках времени защиты с независимой выдержкой времени.

Очевидно, что для более полного использования перегрузочной способности трансформатора следует применять защиты с зависимой от тока выдержкой времени. Такой защитой, в частности, является температурная. Она не требует трансформаторов тока, что очень важно для подстанций без выключателей на высшем напряжении.

§ 13.9. УСТРОЙСТВА ПРЕТВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Автоматическое включение резервного трансформатора. Устройства АВР широко применяются не только для автоматических

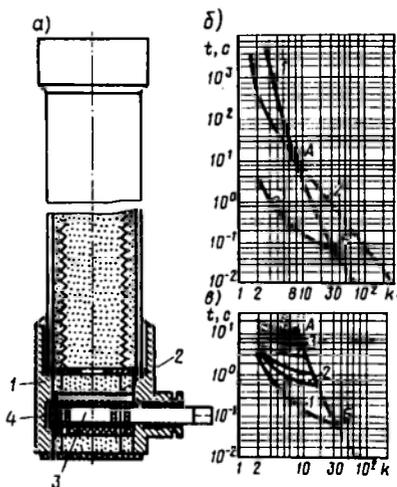


Рис. 13.16. Управляемый предохранитель (а) и характеристики защиты (б)

включений резервных линий, но и трансформаторов. Схемы подстанций обычно выполняются так, что при наличии двух (и более) трансформаторов шины низшего напряжения секционируются. Каждый трансформатор подключается к соответствующей секции шин. В нормальном режиме секционный выключатель $Q4$ отключен (рис. 13.17, а). В такой схеме при аварийном отключении одного

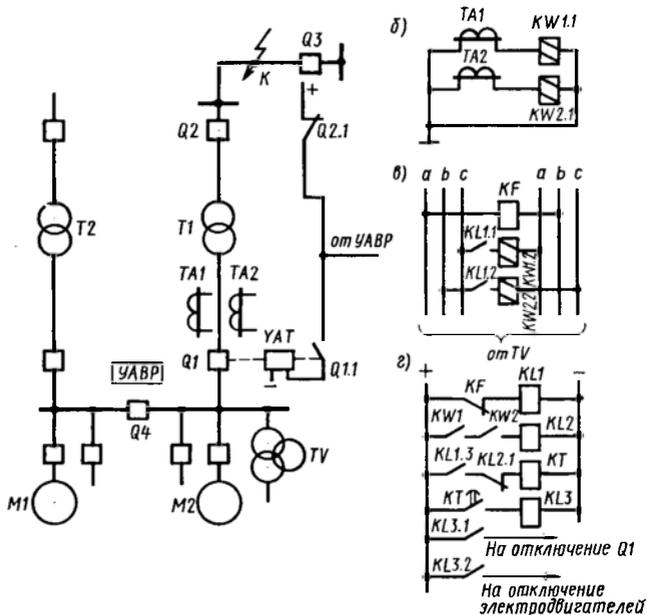


Рис. 13.17. Автоматическое включение резервного трансформатора

из трансформаторов, например $T1$, электроснабжение потребителей сохраняется благодаря автоматическому включению секционного выключателя устройством АВР. Схемы устройств АВР и расчет их уставок выполняются в соответствии с положениями, изложенными выше (см. § 10.6, 10.7). Как указывалось, из-за остаточного напряжения на шинах, поддерживаемого синхронными электродвигателями и компенсаторами, минимальный пусковой орган напряжения действует с замедлением, достигающим $t_{\text{АВР}}=1$ с и выше. На трансформаторах замедление можно устранить, если предусмотреть взаимную связь между его выключателями, обеспечивающую немедленное отключение выключателя $Q1$ и пуск УАВР при отключении выключателя $Q2$ (рис. 13.17, а). Однако при этом не исключается замедленное действие устройства АВР в случае короткого замыкания на линии (точка K).

Для устранения замедления можно использовать защиту от потери питания, содержащую реле понижения частоты KF и реле направления мощности $KW1, KW2$ с вращающим моментом $M_{вр} = kU_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$. Реле включается на междуфазное напряжение и ток отстающей фазы так, чтобы при направлении мощности от источника питания к потребителю контакты реле были замкнуты. В этом случае пусковой орган не должен срабатывать (рис. 13.17, б, в, г). Устройство реагирует на снижение частоты и изменение направления активной мощности или ее исчезновение. При этом контакты реле мощности размыкаются, а контакт реле частоты замыкается и происходит запуск реле времени KT . Выдержка времени KT принимается $t_{АВР1} = 0,3 \dots 0,5$ с. По истечении этого времени срабатывает промежуточное реле $KL3$ и отключает выключатель $Q1$ и электродвигатели, не подлежащие самозапуску. Уставка срабатывания реле частоты принимается 48—48,5 Гц. Напряжение на обмотки реле мощности подается после снижения частоты. Этим облегчается режим работы контактов реле и уменьшается нагрузка на трансформатор напряжения TV . Для большинства самозапускающихся синхронных электродвигателей допустимо повторное включение, если напряжение на их выводах в момент включения не превышает $U_{ост} = (0,5 \dots 0,6) U_{ном}$ [121], поэтому секционный выключатель $Q4$ должен включаться после снижения напряжения на резервируемой секции шин до указанного значения. Для этого устройство АВР должно осуществлять контроль напряжения на секции шин, потерявшей питание.

В ряде конкретных случаев рассмотренный пусковой орган УАВР оказывается недостаточно быстродействующим, что приводит к расстройству технологического процесса предприятия [122]. С целью повышения быстродействия УАВР рекомендуется, например, выполнить пусковой орган устройства, основанный на контроле угла между векторами напряжений рабочего и резервного источников питания [123]. В нормальном режиме этот угол в схемах не превышает $10\text{—}15^\circ$. При повреждении на линии (рис. 13.17) в связи с торможением электродвигателей угол между вектором остаточного напряжения на секции шин, подключенной к поврежденной линии, и вектором напряжения резервной секции шин увеличивается. Это обстоятельство используется для выполнения пускового органа. При наличии на питающей линии устройства АПВ действие УАВР необходимо согласовывать с действием УАПВ. Согласование может привести к значительному увеличению времени восстановления питания.

Автоматическое повторное включение трансформатора. На односторонних трансформаторных подстанциях с односторонним питанием при отключении трансформатора электроснабжение прекращается. Для повышения надежности электроснабжения потребителей предусматривается автоматическое повторное включение трансформатора мощностью более 1 МВ·А после его аварийного

отключения. Пуск устройства АПВ обычно выполняют так, чтобы не допускать включения трансформатора при внутренних повреждениях, которые, как правило, не самоустраняются. При всех внутренних повреждениях, как указывалось (см. § 13.2), срабатывает сигнальный элемент газового реле. Поэтому целесообразно пуск устройства АПВ производить при всех аварийных отключениях трансформатора, но запрещать его повторное включение при срабатывании сигнального элемента газового реле. При этом в действии УАПВ вводится некоторое замедление, исключающее повторное включение трансформатора при внутренних коротких замыканиях, сопровождающихся бурным газообразованием, когда отключающий элемент газового реле срабатывает раньше, чем срабатывает его сигнальный элемент. В отдельных случаях допускается действие УАПВ и при отключении трансформатора защитой от внутренних повреждений. В остальном требования к устройству АПВ и схемы его осуществления аналогичны рассмотренным выше для линии (см. § 10.1, 10.2).

На подстанциях с двумя и более трансформаторами, наряду с устройствами АВР могут предусматриваться и устройства АПВ. При этом действия их должны быть согласованы. В связи с наличием резервного источника питания автоматическое повторное включение ограничивают. Пуск устройства АПВ разрешают только при внешних коротких замыканиях. Для этой цели используют максимальную токовую защиту, установленную со стороны выводов низшего напряжения трансформатора. Срабатывание защиты свидетельствует о возникновении повреждения на шинах или о том, что внешнее короткое замыкание не отключилось соответствующей защитой. При этом отключается выключатель со стороны низшего напряжения трансформатора и устройство АПВ включает его повторно. Во всех остальных случаях напряжение на секцию шин, потерявшую питание, должно подаваться действием устройства АВР.

Автоматическая аварийная разгрузка трансформаторов. Действие устройства аварийной разгрузки аналогично действию защиты от перегрузки. При этом вместо обычного реле времени используется многопозиционное реле, имеющее несколько контактов и позволяющее изменять выдержку времени до $t=10$ мин и более. При действии автоматики потребители отключаются очередями. Выдержка времени первой очереди принимается равной $t_1=5 \dots 10$ мин. Если перегрузка трансформатора при этом не устраняется, то пусковой орган остается в состоянии после срабатывания и автоматика продолжает отключать потребителей других очередей с выдержкой времени на $\Delta t=30$ с большей предыдущей. При определении отключаемой нагрузки исходят из того, чтобы с оставшейся нагрузкой трансформатор мог работать в течение 1,5—2 ч. За это время обслуживающий персонал принимает меры по разгрузке

трансформатора. Ток срабатывания пускового органа принимают $I_{с.р} = (1,3 \dots 1,4) I_{т.ном} / K_1$.

Следует отметить, что устройство автоматической разгрузки принципиально правильно выполнять не по току перегрузки, а в зависимости от температуры обмоток, например температурно-токовыми реле (см. § 13.6).

§ 13.10. АВТОМАТИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Автоматическое отключение и включение трансформатора для уменьшения потерь энергии. В процессе эксплуатации нагрузка параллельно работающих трансформаторов не остается постоянной. При ее снижении может оказаться целесообразным один из трансформаторов отключить, а при восстановлении нагрузки включить снова. Это обусловлено необходимостью достижения минимальных потерь электроэнергии в трансформаторах. Отключать и включать трансформатор можно автоматически.

На рис. 13.18 показана схема устройства автоматики с пусковым органом тока, состоящим из минимального $KA1$ и максимального $KA2$ измерительных реле тока [57]. Реле включены на сумму токов $I_p = I_{21} + I_{2II}$ параллельно работающих трансформаторов (рис. 13.18, а).

При полной загрузке трансформаторов оба реле держат соответствующие контакты $KA1$, $KA2$ разомкнутыми. Снижение нагрузки до некоторого критического по экономичности режима работы трансформаторов значения $I_{кр} = (0,6 \dots 0,8) I_{т.ном}$ вызывает срабатывание минимального реле тока $KA1$ и его контакт $KA1$ замыкает цепь обмотки промежуточного реле $KL1$ (рис. 13.18, б). Это реле при срабатывании контактом $KL1.1$ разрывает цепь обмотки реле $KL2$, контактом $KL1.2$ приводит в действие реле времени KT и контактом $KL1.3$ подготавливает цепь на отключение выключателей одного из трансформаторов. По истечении заданной выдержки времени замыкается контакт $KT.1$ реле времени в цепи обмотки промежуточного реле $KL3$, которое, срабатывая, отключает трансформатор. При нагрузке выше критической срабатывает максимальное реле тока $KA2$ и приходят в действие реле $KL2$, KT и $KL4$, при этом трансформатор включается. В схеме автоматики цепи реле

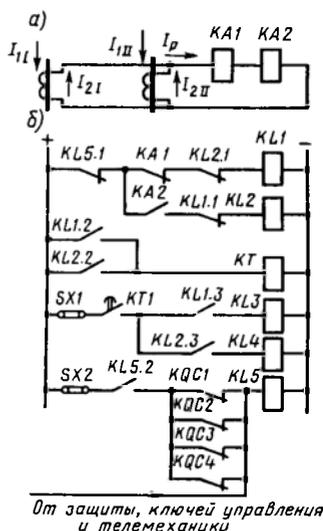


Рис. 13.18. Схема устройства автоматического отключения и включения трансформатора

KL1 и *KL2* взаимосвязаны так, что исключается возможное одновременное действие автоматики на отключение и на включение.

Устройство автоматики с помощью реле *KL5* выводится из работы при отключении любого из выключателей трансформаторов ключом управления, средствами телемеханики или релейной защитой. При этом цепь обмотки реле замыкается контактами реле *KQC.1—KQC.4*, включенных положений выключателей трансформаторов. Автоматика вводится в действие только при включении всех четырех выключателей.

Токи срабатывания пускового органа определяются из следующих соотношений:

$$I_{с.р1} = I_{кр}/k_{отс}K_I; \quad I_{с.р2} = k_{отс}I_{кр}/K_I,$$

где $k_{отс} = 1,05 \dots 1,1$.

В пусковом органе схемы автоматики необходимо использовать реле с высоким коэффициентом возврата $k_{в2} = 0,9 \dots 0,95$ максимального и $k_{в1} = 1,1 \dots 1,05$ минимального реле соответственно. Для исключения одновременного срабатывания реле *KA1* и *KA2* необходимо выполнить следующие условия:

$$I_{с.р1} \leq I_{в.р2} \quad \text{и} \quad I_{в.р1} \leq I_{с.р2},$$

где $I_{в.р2} = k_{в2}I_{с.р2}$ и $I_{в.р1} = k_{в1}I_{с.р1}$.

Выдержка времени реле *KT* принимается равной $t_{с.р} = 3 \dots 5$ мин. Возможны и другие принципы выполнения устройства отключения и включения трансформатора, например в соответствии с заданной программой, разработанной на основе графика нагрузки.

В эксплуатации обычно трансформаторы работают раздельно каждый на определенную секцию шин. В нормальном режиме секционный выключатель отключен (см. рис. 13.17, а). Он включается устройством АВР при аварийном отключении одного из трансформаторов. Однако с точки зрения уменьшения потерь в трансформаторах может оказаться целесообразным оставить в работе только один трансформатор и в нормальном режиме. Поэтому действие рассмотренной автоматики отключения и включения трансформаторов должно быть согласовано с действием устройства АВР. При этом должна быть обеспечена такая последовательность переключений: при снижении нагрузки и отключении одного из трансформаторов сначала включается секционный выключатель *Q4*, а затем последовательно отключаются выключатели *Q1* и *Q2* со стороны низшего и высшего напряжения трансформатора; при увеличении нагрузки сначала включается выключатель *Q2* со стороны высшего напряжения, а затем выключатель *Q1* со стороны низшего напряжения трансформатора, после этого отключается секционный выключатель *Q4*.

Для такого согласованного действия и определения необходимости переключений трансформаторов нужно измерять две величины: суммарный ток трансформаторов и ток нагрузки одной из секций. После отключения единственного работающего трансформатора устройство АВР должно включить другой трансформатор. При работе двух трансформаторов и аварийном отключении одного из них устройство АВР действует на включение секционного выключателя.

Автоматическое регулирование напряжения трансформаторов. Нормальная работа потребителей электроэнергии обеспечивается при определенном напряжении. Отклонение напряжения в ту или

другую сторону приводит к снижению качества продукции, сокращению срока службы электротехнического оборудования, повышению его повреждаемости и т. п. Этим определяется необходимость поддерживать напряжение у потребителя на заданном уровне. Требуемые условия и экономичность всей системы электроснабжения наиболее полно обеспечиваются при автоматическом регулировании напряжения. При наличии на подстанциях и в трансформаторных пунктах трансформаторов, снабженных устройствами для регулирования под нагрузкой (УРПН), появляется возможность автоматически регулировать напряжение путем переключения числа витков одной из обмоток трансформатора без его отключения. Обычно переключающее устройство располагают на стороне высшего напряжения.

Трансформатор с УРПН поставляется заводами с автоматическим регулятором напряжения (АРНТ). Совместно с трансформатором АРНТ образует автоматическую систему регулирования коэффициента трансформации. Основными характеристиками автоматической системы регулирования являются:

степень регулирования $U_{ст}$ — напряжение между двумя ответвлениями обмотки, выраженное в процентах от ее номинального напряжения; в зависимости от типа трансформатора $U_{ст} = 1,25 \dots 2,5 \%$;

зона нечувствительности $\Delta U_{нч}$ — некоторый диапазон изменения напряжений, при котором не срабатывает автоматический регулятор; зону нечувствительности выражают в процентах относительно номинального напряжения; для исключения излишних срабатываний регулятора зона нечувствительности должна быть больше степени регулирования, т. е. $\Delta U_{нч} > U_{ст}$;

точность регулирования — показатель, характеризующий изменением напряжения, равным половине зоны нечувствительности;

выдержка времени — параметр, исключающий действие регулятора при кратковременных отклонениях напряжения;

уставка регулятора — напряжение, которое должен поддерживать регулятор.

Процесс регулирования иллюстрируется графиками (рис. 13.19, а). Линией 3 обозначена уставка регулятора, а линиями 5 и 1 — границы зоны нечувствительности $\Delta U_{нч}$, определяющие значения напряжения, при которых регулятор приходит в действие. Как следует из графиков, требуемое значение напряжения (прямая 3) поддерживается с точностью, равной $\pm \Delta U_{нч}/2$. В общем случае регулятор имеет коэффициент возврата, отличающийся от единицы. На рис. 13.19, а напряжения возврата изображены прерывистыми штриховыми линиями 4 и 2. Регулятор находится в состоянии после срабатывания до тех пор, пока напряжение на его входе находится за пределами зоны, ограниченной напряжениями возврата. Переключение ответвлений происходит, если время отклонения напряжения за пределы зоны нечувствительности пре-

вышает выдержку времени регулятора t_1 и время действия приводного механизма t_2 , вместе взятых. При этом график напряжения из точки m скачкообразно переходит в точку n , т. е. напряжение увеличивается на ступень регулирования $U_{ст}$. При втором срабатывании регулятора переключения не происходит, так как время отклонения напряжения

$$t_3 < t_1 + t_2.$$

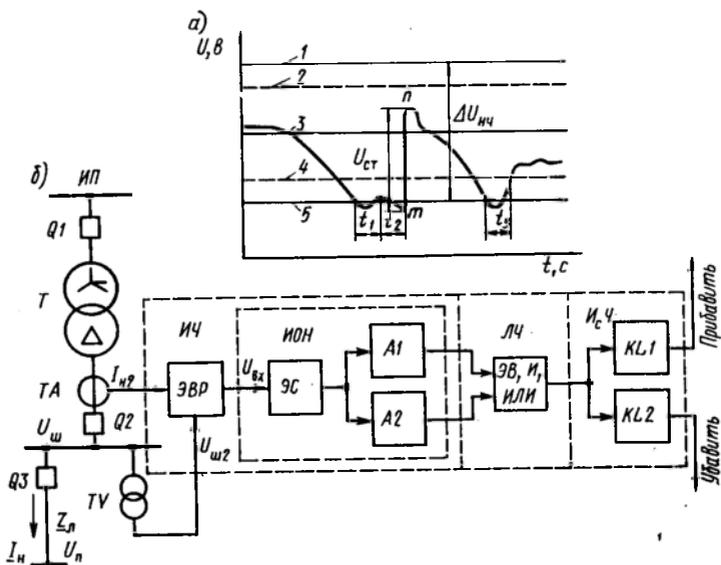


Рис. 13.19. Автоматическое регулирование коэффициента трансформации трансформатора

Очевидно, что увеличение зоны, определяемой разностью напряжений срабатывания (линии 5 и 1) и возврата (линии 4 и 2) регулятора, т. е. снижение коэффициента возврата, приводит к снижению точности автоматического регулирования напряжения.

Наряду с устройствами АРНТ, поставляемыми заводами комплектно с трансформаторами, в ряде энергосистем эксплуатируются регуляторы, изготовленные собственными лабораториями. Несмотря на разнообразие выполнения, регуляторы напряжения могут быть представлены единой функциональной схемой, содержащей три функциональные части (на рис. 13.19, б измерительную ИЧ, логическую ЛЧ и исполнительную ИСЧ).

Характерным элементом измерительной части является элемент встречного регулирования ЭВР, обеспечивающий статическую характеристику регулятора. Это необходимо для поддержания напряжения у потребителя U_n на заданном уровне независимо от тока

нагрузки I_n . Напряжение у потребителя $\underline{U}_n = \underline{U}_{ш} - I_n \underline{Z}_л$, поэтому с увеличением $I_n \underline{Z}_л$ необходимо увеличивать и напряжение на шинах $\underline{U}_{ш}$ подстанции так, чтобы напряжение \underline{U}_n оставалось постоянным. Поэтому элемент встречного регулирования, представляющий собой устройство установкой статизма (см. § 12.11), выполнен по схеме *токовой компенсации*, с помощью которой имитируется падение напряжения $I_n \underline{Z}_л \sim I_{н2} \underline{Z}_{т.к.}$. Схема токовой компенсации подключается к трансформаторам тока TA так, что увеличение тока I_n регулятор воспринимает как понижение напряжения на шинах и действует в сторону его повышения.

Измерительный орган напряжения ИОН содержит элемент сравнения напряжения ЭС и усилители $A1$ и $A2$ с релейной характеристикой. Элемент сравнения сравнивает напряжение $\underline{U}_{вх} = |\underline{U}_{ш2} - I_{н2} \underline{Z}_{т.к}|$ с заданным напряжением. В зависимости от знака отклонения напряжения он воздействует на соответствующий релейный усилитель $A1$ или $A2$. Измерительный орган выполняют по-разному. В простейшем случае для этого используют два электромагнитных реле напряжения: минимальное и максимальное. В регуляторах используются измерительные органы, составной частью которых является диодная схема сравнения абсолютных значений двух электрических величин: напряжения на входе измерительного органа и эталонного напряжения, устанавливаемого стабилизаторами или туннельными диодами [124, 125]. В автоматическом регуляторе АРТ-1Н [77] измерительный орган напряжения изменяет частоту импульсов в зависимости от знака отклонения напряжения. Такие измерительные органы имеют высокий коэффициент возврата и изменяемую зону нечувствительности.

Логическая часть содержит элемент выдержки времени ЭВ и элементы ИЛИ, И. Выдержка времени необходима для исключения действия регулятора при кратковременных изменениях напряжения. Уставку по времени выбирают такой, чтобы обеспечить качественное регулирование напряжения при минимально возможном количестве переключений в сутки. В зависимости от графика изменения напряжения на подстанции уставка по времени принимается в пределах $t_1 = 1 \dots 5$ мин. Элементы ИЛИ, И выполняют соответствующие логические операции, обеспечивающие функционирование регулятора в целом.

Исполнительная часть содержит реле $KL1$ и $KL2$, при срабатывании которых создаются воздействия на привод переключателя ответвлений. Регулятор действует так, что при повышении напряжения срабатывает реле $KL2$, а при понижении напряжения — реле $KL1$.

Наиболее совершенным из известных регуляторов, выполненных на основе бесконтактных элементов, является регулятор АРТ-1Н [77]. Он обеспечивает автоматическое регулирование напряжения на подстанциях как с непрерывно, так и с резко изменяющейся

нагрузкой и имеет возможность введения внешнего изменения уставки по напряжению, а также группового регулирования параллельно включенных трансформаторов, контроля исправности элементов собственной схемы и привода УРПН.

На рис. 13.20, а показаны упрощенная функциональная схема и график, иллюстрирующие действия автоматического регулятора АРТ-1Н [57, 77]. В схему регулятора входит также блок управления и контроля БУК, который состоит из управляемого генератора тактовых импульсов G и блока контроля БК. Генератор G воздействует на логическую часть регулятора и на БК, обеспечивая необходимые импульсность и однократность действия регулятора на приводной механизм.

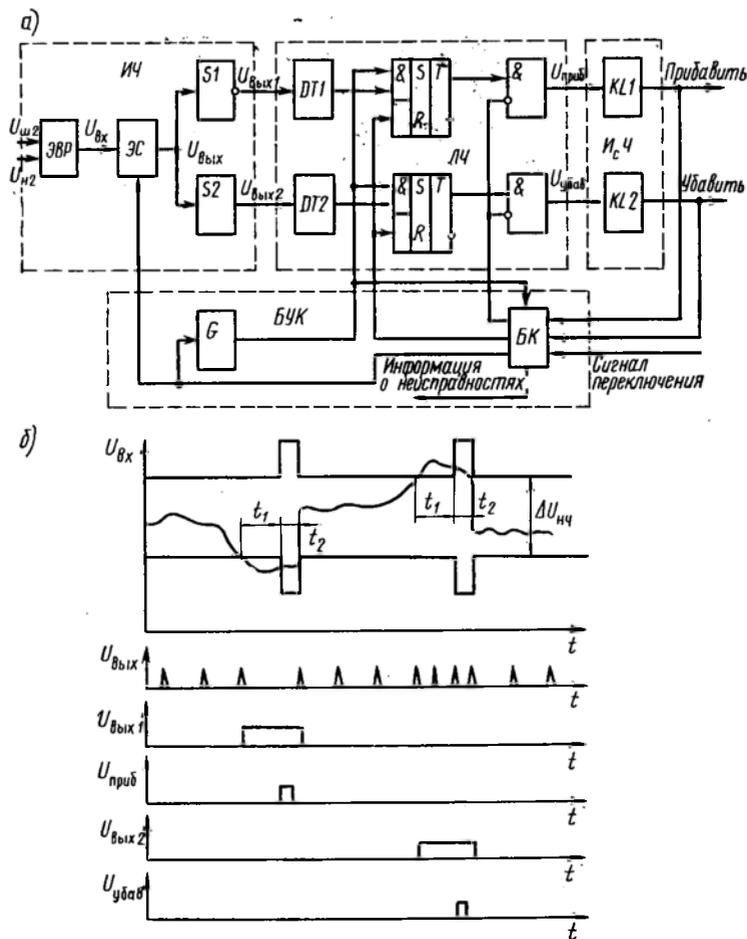


Рис. 13.20. Структурная схема (а) и временные диаграммы автоматического регулятора АРТ-1Н (б)

Измерительная часть регулятора содержит элемент встречного регулирования ЭВР, элемент сравнения ЭС, расширители импульсов S1, S2. С выхода элемента встречного регулирования на вход элемента сравнения подается контролируемое напряжение $U_{вх}$. В результате преобразования $U_{вх}$ и сравнения на выходе схемы сравнения появляется напряжение $U_{вых}$ в виде последовательных импульсов (рис. 13.20, б). Если напряжение $U_{вх}$ не выходит за пределы зоны нечувствительности $\Delta U_{нч}$, то импульсы следуют с частотой 50 Гц. Когда напряжение $U_{вх}$ снижается и выходит за пределы зоны нечувствительности, импульсы отсутствуют. При повышении напряжения $U_{вх}$ и выходе его за пределы зоны нечувствительности напряжение $U_{вых}$ представляет собой последовательность импульсов частотой 100 Гц. На рис. 13.20, б показан случай, когда время отклонения напряжения за пределы зоны нечувствительности превышает выдержку времени регулятора t_1 и время действия приводного механизма t_2 , вместе взятых. В этом случае при отсутствии импульсов $U_{вых}$ на выходе расширителя S1 формируется потенциальный сигнал $U_{вых1}$, а при наличии импульсов частотой 100 Гц сигнал $U_{вых2}$ формируется на выходе расширителя S2. При частоте импульсов 50 Гц (напряжение $U_{вх}$ не выходит за пределы зоны нечувствительности) сигналы $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$ отсутствуют.

Логическая часть регулятора состоит из элементов выдержки времени DT1, DT2, триггеров T и элементов запрета И. При появлении напряжения $U_{вых1}$ или $U_{вых2}$ запускается соответствующий элемент выдержки времени DT1 или DT2. По истечении времени t_1 элемент DT срабатывает, напряжение с его выхода и тактовый импульс от генератора G через логическую схему И поступают на вход записи S триггера T. Срабатывание элемента DT запоминается триггером T в виде логической единицы на выходе. Этот сигнал подается на вход соответствующего элемента запрета И, на выходе которого формируется напряжение $U_{проб}$ ($U_{убав}$).

Исполнительная часть регулятора содержит реле KL1, KL2, запускающие приводной механизм. Реле KL1 срабатывает при подаче на его вход напряжения $U_{проб}$, а реле KL2 — напряжения $U_{убав}$.

Блок контроля (БК) контролирует работу регулятора и приводного механизма и при завершении операции переключения или при их неисправности прекращает действие регулятора. Достигается это следующим образом. При срабатывании регулятор воздействует на приводной механизм, от которого после начала переключения поступает сигнал на вход блока контроля. При этом блок контроля производит следующие операции:

блокирует элементы запрета И (подает логическую единицу на инверсный вход) и тем самым снимает сигнал $U_{проб}$ ($U_{убав}$) и прекращает действие регулятора;

воздействует на элемент сравнения (ЭС), увеличивая зону нечувствительности регулятора $U_{нч}$ (рис. 13.20, б); при этом сигнал $U_{вых1}$ ($U_{вых2}$) измерительной части снижается, если регулятор функционирует правильно; сохранение сигнала свидетельствует о неисправности регулятора; в этом случае блок контроля запрещает повторный запуск приводного механизма;

подает сигнал на вход R считывания триггера T и возвращает его в исходное состояние;

воздействует на генератор G, увеличивая период следования тактовых импульсов до времени, превышающего время переключения одного ответвления обмотки трансформатора, чем контролируется исправность приводного механизма. При исправном механизме в блок контроля поступает сигнал о завершении процесса переключения и появления импульса от генератора через увеличенный период. При отсутствии сигнала повторное воздействие регулятора на приводной механизм запрещается. Повторное воздействие запрещается и при отсутствии сигнала о начале процесса переключения; это также свидетельствует о неисправности приводного механизма. Известен также регулятор УАРТН-2М, разработанный в МЭИ [77]. В эксплуатации находятся и более простые регуляторы, такие, например, как регулятор БАУРПН [126],

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ПОДСТАНЦИЙ БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА СТОРОНЕ ВЫСШЕГО НАПРЯЖЕНИЯ И ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

§ 14.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Для сокращения затрат на сооружение электроустановок и облегчения эксплуатации в ряде случаев их выполняют по упрощенным схемам — с уменьшенным числом выключателей. Устанавливаемые выключатели являются общими для нескольких элементов, и поэтому защита и автоматика таких установок имеют некоторые особенности. К установкам с упрощенными схемами относятся установки с блочными схемами, подстанции без выключателей на стороне высшего напряжения и линии с ответвлениями.

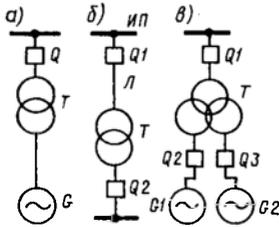


Рис. 14.1. Блочные схемы

Блочные схемы (рис. 14.1) применяются в тех случаях, когда несколько элементов системы электроснабжения, например генератор G и повышающий трансформатор T (рис. 14.1, а), трансформатор и линия (рис. 14.1, б), могут соединяться в последовательную цепь без поперечных связей между одноименными элементами различных цепей.

Элементы, объединяемые в блок, не работают один без другого, поэтому выключатели между ними не ставят. На элементах блока должны ставиться те же виды защиты и автоматики, что и на аналогичных элементах той же мощности, работающих раздельно. Устройства автоматики принципиальных особенностей не имеют, а устройства защиты выполняются с учетом следующих обстоятельств [3]:

защиты от многофазных коротких замыканий в элементах блока и от однофазных коротких замыканий обмоток высшего напряжения трансформатора блока выполняются действующими на отключение всего блока [исключение — защита блока с двумя генераторами (рис. 14.1, в) или защита ему подобных блоков, где повреждение одного из одинаковых элементов, например $G1$, $G2$, отключается его выключателем $Q2$, $Q3$]. В качестве защиты от многофазных коротких замыканий используется продольная дифференциальная защита, которая может быть общей для всего блока; вместе с ней желательна также индивидуальная дифференциальная защита генератора как более чувствительная; она обязательна, если генератор имеет отдельный выключатель;

защиты от внешних коротких замыканий и от перегрузки также могут выполняться общими для всего блока, так как при этих режимах сверхтоки проходят по всем элементам блока;

защита от замыканий на землю на стороне низшего напряжения блоков с генераторами может выполняться упрощенно, так как отсутствует электрическая связь этой стороны со смежными элементами блока.

Если распределительная сеть имеет напряжение 10 кВ, то для использования электродвигателей на 6 или 3 кВ их объединяют в блоки с трансформаторами, имеющими схему соединения обмоток Y/Δ . На блоках трансформатор — двигатель в качестве защит, общих для обоих элементов блока, могут использоваться токовая и дифференциальная отсечки, а также токовая дифференциальная защита. Они выполняются с учетом тех же требований, какие предъявляются к ним при отдельной защите трансформатора и электродвигателя.

Защиты блоков должны иметь повышенную чувствительность, так как токи к. з. в электродвигателе ограничиваются сопротивлением трансформатора. Защита от замыканий на землю не устанавливается, так как ток замыкания на землю невелик.

Подстанции без выключателей на стороне высшего напряжения часто получают питание не по отдельным линиям, а присоединяются к ответвлениям от линий электропередачи (см. ниже рис. 14.4, а, б, в). На стороне высшего напряжения этих подстанций часто устанавливаются короткозамыкатели QN и отделители QR , автоматика которых должна действовать согласованно с автоматикой, имеющейся на выключателях линий.

Линии с ответвлениями можно считать многоконцевыми линиями. Защита таких линий также имеет некоторые особенности, сохраняющиеся и в тех случаях, когда на ответвлениях вместо короткозамыкателей и отделителей устанавливаются выключатели или плавкие предохранители.

§ 14.2. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ПОДСТАНЦИЙ БЕЗ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ НА СТОРОНЕ ВЫСШЕГО НАПЯЖЕНИЯ

Известно, что значительную часть стоимости подстанций составляет стоимость выключателей на стороне высшего напряжения. В связи с этим все более широко применяются подстанции, выполненные по схемам с минимальным количеством выключателей и без них на стороне высшего напряжения. Техничко-экономический эффект от применения таких подстанций заключается в возможности отказаться не только от выключателей, но и от аккумуляторных батарей и компрессорных установок. Важным фактором является также уменьшение площади участка, занимаемого подстанцией, и, кроме того, резкое сокращение сроков строительства. Одновременно снижаются расходы на эксплуатацию таких подстанций благодаря автоматизации и отказу от постоянного обслуживающего персонала.

Наибольшее распространение получили схемы подстанций с использованием комплектов отделитель — короткозамыкатель. Разработаны и применяются схемы, выполненные на основе предохранитель-короткозамыкатель, а также схемы без коммутационной аппаратуры на стороне высшего напряжения. Все эти схемы имеют разные возможности для обеспечения требуемой защиты и автоматике подстанций. Их можно классифицировать, например, по способу отключения поврежденного трансформатора подстанции. В одних случаях трансформатор отключается головным выключателем линии и для этого необходимо создавать искусственные короткие замыкания или использовать средства телемеханики, а на трансформаторе устанавливать релейную защиту, в других — трансформатор отключается плавкими предохранителями, выполняющими также функции защиты.

Подстанции без коммутационной аппаратуры на стороне высшего напряжения являются наиболее простыми. Трансформатор присоединяется к линии по схеме блока линия — трансформатор Л—Т (см. рис. 14.1, б). При повреждении трансформатора подстанция отключается головным выключателем $Q1$, установленным в начале линии. При этом если релейная защита линии имеет достаточную чувствительность к повреждениям на выводах низшего напряжения трансформатора, то на трансформаторе защиту со стороны высшего напряжения можно не устанавливать. Для предотвращения повреждений обмоток трансформатора при внешних коротких замыканиях выдержка времени защиты линии должна быть не больше времени термической стойкости защищаемого трансформатора. Однако защита линии часто не обладает достаточной чувствительностью и необходимым быстродействием при повреждении внутри трансформатора. В таких случаях на трансформаторе предусматривается собственная релейная защита. Она, как и защита линии, действует на отключение головного выключателя. Отключающий сигнал передается с помощью устройств телемеханики, что может привести к усложнению и удорожанию защитного устройства, поэтому целесообразна разработка простейших устройств телемеханики, рассчитанных на передачу одной-двух команд, способных работать как по каналу телемеханики, так и с аппаратурой высокочастотной телефонной связи без специально выделенных каналов, например с аппаратурой ВЧА-СЧ. Это позволяет телемеханизировать значительную часть подстанций упрощенного типа распределительных сетей 35—110 кВ без существенных дополнительных капитальных вложений и при минимальном объеме монтажных и наладочных работ. При наличии на таких подстанциях короткозамыкателей за ними могут сохраняться только функции резервирования.

Такое устройство телеотключения (ТО) для совместной работы с аппаратурой высокочастотной связи типов ВЧА-СЧ, АСК-1 и т. д. разработано для

РЭУ Ульяновскэнерго [127]. Принцип его действия основан на использовании вызывных частот $F1=1200$ Гц и $F2=1600$ Гц для передачи команды отключения. Передатчик устанавливается на подстанции, а приемник — на линии со стороны питания (рис. 14.2). При срабатывании релейной защиты трансформатора АК осуществляется запуск высокочастотных генераторов $G1$ и $G2$ аппаратуры телефонной связи. Генератор $G2$ включается на все время передачи команды отключения, а генератор $G1$ периодически включает управляющим сигналом с частотой 25 Гц. При этом на головную подстанцию по каналу телефонной связи передается постоянный сигнал частоты $F2$ к приемнику $A4$ и импульсы частоты $F1$ к приемнику $A3$. Длительность посылок импульсов частоты $F1$ выбрана с учетом помехозащищенности самого устройства ТО и телефонной связи. При определенной комбинации $F1$ и $F2$ элементом $A2$ формируется команда на отключение выключателя.

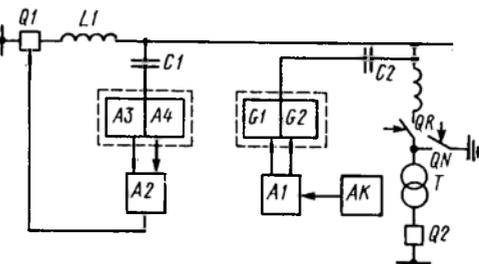


Рис. 14.2. Функциональная схема устройства телеотключения

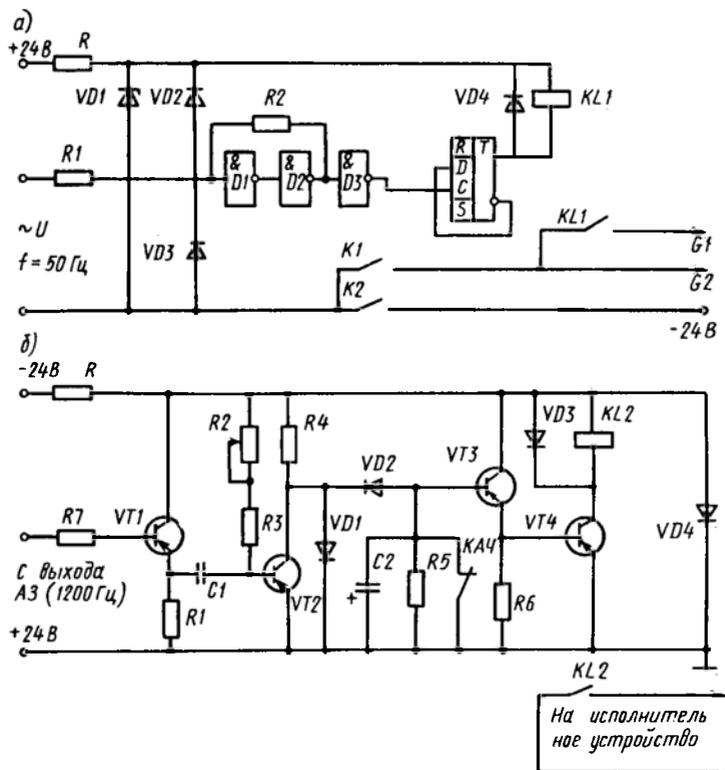


Рис. 14.3. Принципиальная схема передающего (а) и принимающего (б) полуккомплектов устройства телеотключения

На рис. 14.3 показаны принципиальные схемы передающего и принимающего комплектов устройства, выполненных на полупроводниковой элементной базе. На вход передающего полукомплекта (рис. 14.3, а) подается синусоидальное напряжение частотой 50 Гц из блока питания аппаратуры телефонной связи. Это напряжение триггером Шмитта ($D1-D3$) преобразуется в прямоугольные импульсы, которые поступают на счетный вход триггера T . Он преобразует их в импульсы частотой 25 Гц. С этой частотой герконовое реле $KL1$ управляет

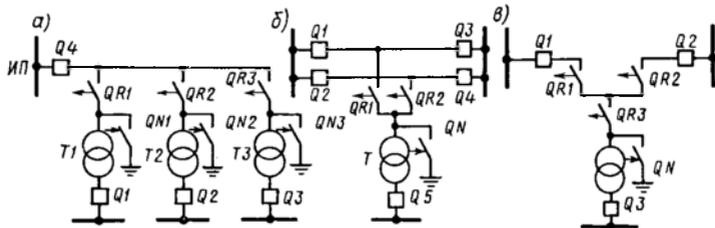


Рис. 14.4. Схемы подстанций без выключателей на стороне высшего напряжения

работой генератора $G1$. При действии релейной защиты замыкаются контакты $K1$ и $K2$ и осуществляется пуск генераторов $G1$ и $G2$.

В принимающем полукомплекте (рис. 14.3, б) импульсы частотой $F1$ с выхода приемника $A3$ аппаратуры телефонной связи поступают на эмиттерный повторитель, усиливаются и заряжают конденсатор $C2$ до уровня, достаточного для пересключения транзисторов $VT3$ и $VT4$. При этом реле $KL2$ срабатывает и замыкает цепь отключения выключателя. Заряд конденсатора $C2$ возможен только при разомкнутом контакте $KA4$, что соответствует наличию на принимающем полукомплекте постоянного сигнала частоты $F2$. Аналогичное устройство выполнено и на основе электромеханических реле [127].

Подстанции с короткозамыкателями и отделителями выполняются по схемам, показанным на рис. 14.4, а, б, в. Наличие на стороне высшего напряжения трансформатора отделителя QR и короткозамыкателя QN не требует специальной системы передачи сигнала на отключение линии при срабатывании защиты трансформатора. В этом случае релейная защита трансформатора действует на включение короткозамыкателя QN и при этом создается искусственное к. з. в зоне действия защиты линии. После ее отключения ток к. з. исчезает и отделитель отключается. Приводы короткозамыкателя и отделителя выполняются на основе пружинно-грузовых приводов выключателей, причем первый из них освобождает включающую пружину короткозамыкателя, а второй — отключающие пружины отделителя. Отключение короткозамыкателя и включение отделителя производятся вручную.

Схема управления короткозамыкателем и отделителем, установленными на тупиковой подстанции, показана на рис. 14.5. К подстанции идет линия L , на питающем конце которой установлены быстродействующая защита и защита с выдержкой времени. В рассматриваемой схеме питание электромагнитов отключения отделителя $YAT1$ и выключателя $YAT2$ на стороне напряжения 6—10 кВ, промежуточного реле $KL1$, а также обмотки $KL2.2$ двухпозиционного реле

ле $KL2$ осуществляется от предварительно заряженных конденсаторов $C1—C4$, включенных через разделительные диоды $VD1—VD4$. Для заряда конденсаторов использованы зарядные устройства БПЗ-401 и БПЗ-402.

При оперативном отключении подстанции ключом $SA1$ отключают выключатель $Q2$ на стороне низшего напряжения, а затем ключом $SA2$ отключают отделитель QR . Обратный порядок отключения (сначала QR , а затем $Q2$) невозможен, так как вспомогательный контакт $Q2.1$ выключателя препятствует отключению отделителя, способного отключать лишь ток холостого хода трансформатора. Отключение подстанции по каналу телеуправления происходит при замыкании контактов $KCT.1$ и $KCT.2$.

При повреждении трансформатора и аварийном его отключении могут быть два случая: срабатывает только защита трансформатора; вместе с защитой трансформатора срабатывает защита линии и отключает выключатель $Q1$.

В первом случае защита трансформатора контактом $A.2$ замыкает цепь контактора $KM1$ включения короткозамыкателя QN . После включения QN защита линии отключает выключатель $Q1$. В этом случае условиями отключения отделителя QR являются отсутствие тока в цепи защищаемого трансформатора, включенное положение короткозамыкателя QN и отсутствие тока в его цепи. Для получения этой информации используют реле $KA1$ и $KA2$ (рис. 14.5, а) и вспомогательные контакты короткозамыкателя $QN.1$. Контакты реле $KA1$, $KA2$, вспомогательный контакт $QN.1$ включены последовательно в цепь реле $KL1$, которое при срабатывании замыкает контакт $KL1.1$ в цепи $YAT1$ и действует на отключение отделителя (рис. 14.5, б).

При включении короткозамыкателя его вспомогательные контакты $QN.1$ могут замкнуться раньше основных контактов и отделитель начнет отключаться. В этом случае он отключает токи короткого замыкания, что приводит к аварии. Чтобы избежать этого, используют промежуточное реле $KL1$ с замедлением при срабатывании.

Если вместе с защитой трансформатора срабатывает защита линии и отключается выключатель $Q1$ до включения короткозамыкателя QN , то вспомогательный контакт $QN.1$ в цепи обмотки реле $KL1$ остается разомкнутым. В этом случае отключение отделителя QR в бестоковую паузу происходит благодаря действию двухпозиционного реле $KL2$, контакт $KL2.1$ которого дублирует вспомогательный контакт $QN.1$. Двухпозиционное реле переключается при срабатывании защиты трансформатора (замыкается контакт $A.1$).

Из устройств автоматики на одотрансформаторных подстанциях с отделителями и короткозамыкателями применяется УАПВ шин низшего напряжения. Чтобы это устройство не приходило в действие при повреждениях в трансформаторе, вспомогательные контакты короткозамыкателя выполняют соответствующий запрет. На двухтрансформаторных подстанциях кроме УАПВ секций шин низ-

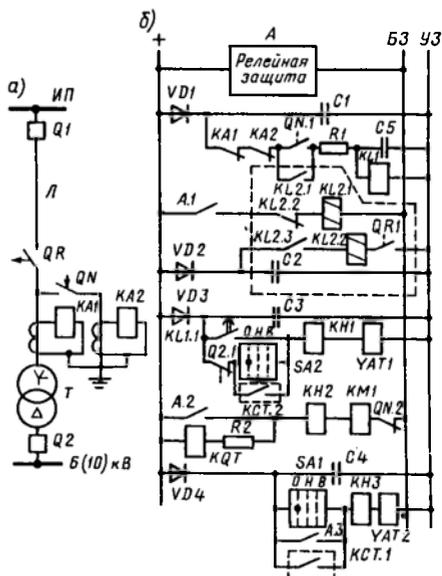


Рис. 14.5. Схема управления короткозамыкателем и отделителем

шего напряжения применяются устройства АВР секционного выключателя и АВР на отделителях (если трансформаторы получают питание по отдельным линиям). Схемы устройств АВР секционного выключателя имеют обычное выполнение и отличаются только тем, что имеют цепь пуска от вспомогательных контактов короткозамыкателей. В устройствах АВР на отделителях согласованное действие всех аппаратов первичных цепей также обеспечивается включением в схему вспомогательных контактов этих аппаратов.

Одна из таких схем показана на рис. 14.6 [57]. В нормальном режиме на подстанции (рис. 14.6, *а*) включены отделители $QR1$, $QR2$ и выключатели $Q1$, $Q2$; остальные коммутационные аппараты отключены. На рис. 14.6, *б*, *в* показана та часть полной схемы УАВР на отделителях, которая восстанавливает питание трансформатора $T1$ после отключения линии $L1$. Выполнение другой части схемы (действующей при исчезновении напряжения на линии $L2$) аналогично.

При рассмотрении работы схемы следует иметь в виду, что кроме УАВР на отделителях подстанция имеет следующие виды автоматики: УАПВ выключателей $Q1$ и $Q2$, УАВР секционного выключателя $Q3$. Схема УАВР на отделителях выполнена с использованием энергии предварительно заряженных конденсаторов $C1—C3$.

Если линия $L1$ отключается, то исчезает напряжение на секции I (рис. 14.6, *а*). При этом действует минимальная защита напряжения — реле $KVT1$, $KT1$, $KT2$ (рис. 14.6, *б*). По истечении заданной выдержки времени замыкаются контакт $KVT1$ и импульсный контакт реле $KT1.1$ (рис. 14.6, *в*). Если на резервном источнике питания (линия $L2$) имеется напряжение, то контакт реле $KVT2$ тоже замкнут и обмотка реле $KL1$ подключается к предварительно заряженному конденсатору $C1$. Реле срабатывает и контактом $KL1$ отключает выключатель $Q1$. Затем контактом $KT1.2$ реле $KT1$ замыкается цепь электромагнита $YAT1$ отключения отделителя $OR1$. В цепь электромагнита $YAT1$ отключения отделителя $QR1$ включены вспомогательные контакты: $QN1.1$ — короткозамыкателя $QN1$; $QR3.1$ — отделителя $QR3$; $Q1.1$ — выключателя $Q1$, — позволяющие действовать автомату на отключение $QR1$ только в том случае, если все указанные аппараты отключены.

После отключения отделителя $QR1$ дорабатывает реле времени $KT2$. Его контакт $KT2$ подключает к конденсатору $C3$ электромагнит $YAC3$ включения отделителя $QR3$; вспомогательные контакты $QN1.2$, $QR1.1$, $QR2.1$ и $Q1.2$ в цепи электромагнита разрешают включить отделитель $QR3$, если отключены $QN1$, $QR1$ и $Q1$, а отделитель $QR2$ включен.

Включившись, отделитель $QR3$ подает напряжение на трансформатор $T1$. Его выключатель $Q1$ снабжен устройством АПВ с контролем наличия напряжения на выводах низшего напряжения трансформатора (реле контроля подключено к трансформатору собственных нужд $T3$). При появлении напряжения устройство АПВ приходит в действие и включает выключатель $Q1$. Питание потребителей секции I восстанавливается.

При отказе по какой-либо причине автоматики отделителей напряжение на $T3$ не восстанавливается. В таком случае действует устройство АВР секционного выключателя $Q3$.

Аналогично выполняется и автоматика одотрансформаторных подстанций, подключаемых через отделители к параллельным линиям (см. рис. 14.4, *б*). Если подстанция транзитная (см. рис. 14.4, *в*), то защита и автоматика линии взаимодействуют с автома-

тикой подстанции следующим образом. При неустойчивом коротком замыкании на линии она отключается соответствующей защитой с обоих концов, после чего устройства АПВ линии (выполняемые двукратными) восстанавливают схему в первом цикле АПВ. При устойчивом коротком замыкании на линии после первого цикла АПВ защита вновь отключает линию и в следующую за этим бестоковую паузу автоматика отключает отделитель, соединенный с поврежденным участком. Какой из двух отделителей должна

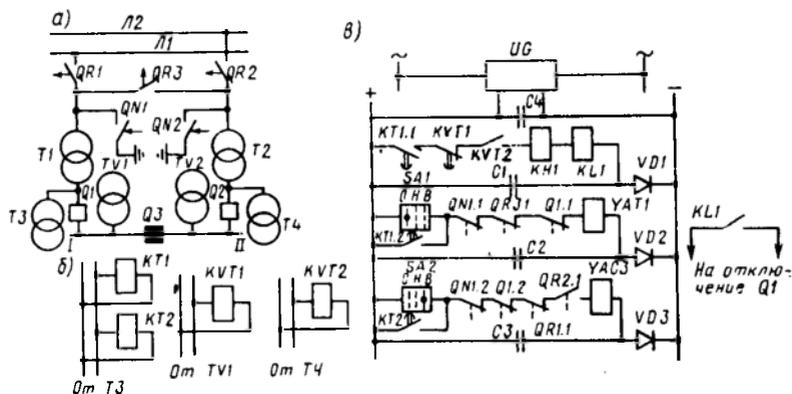


Рис. 14.6. Устройство АВР на отделителях

отключить автоматика, предварительно (до отключения линейных выключателей) выявляет направленная защита, установленная на подстанции. При действии этой защиты срабатывает реле фиксации, подготавливающее цепь отключения отделителя. По окончании бестоковой паузы второго цикла выключатели линии снова включаются. Один из них включается на существующее короткое замыкание и затем окончательно отключается защитой, а второй восстанавливает питание подстанции.

Схема автоматики, работающей в описанной последовательности, приведена в [57].

Подстанции с отделителями и короткозамыкателями по сравнению с подстанциями с выключателями проще и дешевле по капитальным затратам. Однако в связи с малой надежностью современных отделителей и короткозамыкателей, несовершенством и громоздкостью их конструкций суммарные приведенные затраты с учетом ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям на этих подстанциях выше, чем на подстанциях с выключателями. Кроме того, время включения серийно выпускаемых короткозамыкателей на 110 кВ с пружинным приводом составляет не менее $t_B = 0,5 \dots 0,7$ с, что приводит к увеличению объема повреждения в трансформаторе и суммарного времени аварийного состояния сети.

Более совершенны элегазовые аппараты. Быстродействующий пневматический привод снижает время включения короткозамыкателя до $t_{в}=0,1$ с. Однако элегазовые аппараты более чем в два раза дороже обычных того же напряжения. За рубежом (США, Чехо-Словакия) применяются быстродействующие короткозамыкатели с пиротехническим приводом. Их недостатком является однократность действия и использование опасных взрывчатых веществ. Предложены быстродействующие короткозамыкатели с использованием дугового разряда, возникающего между электродами, один из которых подключается к фазе на стороне высшего напряжения трансформатора, а другой соединяется с землей или с соседней фазой. Время действия такого короткозамыкателя $t_{в}=0,07 \dots 0,08$ с.

Подстанции с открытыми плавкими вставками отличаются дешевизной и простотой. Плавкие вставки заменяют собой короткозамыкатели и отделители. Перегорание вставок сопровождается коротким замыканием, что приводит к срабатыванию защиты линии и отключению ее выключателя. На подстанциях с открытыми плавкими вставками иногда устанавливают короткозамыкатель, включаемый при действии газовой и дифференциальной защит трансформатора и ускоряющий перегорание плавких вставок. Выбор сечения открытой плавкой вставки для защиты трансформатора рассмотрен в § 13.7.

Подстанции с предохранителями могут выполняться однострансформаторными и двухтрансформаторными. Подробные сведения о защите трансформаторов предохранителями даны в § 13.7. При совместном использовании предохранителей и короткозамыкателя появляется возможность управлять моментом срабатывания предохранителей. При этом защитные функции предохранителя частично или полностью передаются более совершенному защитному устройству — релейной защите трансформатора, действующей на включение короткозамыкателя. Отпадает также необходимость в отключении выключателя линии.

Однако в связи с наличием короткозамыкателя сохраняется основной недостаток — искусственные короткие замыкания при действии защиты трансформатора. Предохранителями можно управлять и без использования короткозамыкателя. Такие управляемые предохранители рассмотрены выше (см. § 4.3, 13.8). Они являются выключателями однократного действия и поэтому при срабатывании защиты трансформатора не требуют ни создания искусственного короткого замыкания, ни канала связи для передачи сигнала на отключение выключателя линии. В этом преимущество подстанций с управляемыми предохранителями перед другими подстанциями без выключателей на стороне высшего напряжения [128].

§ 14.3. ОСОБЕННОСТИ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЛИНИЙ С ОТВЕТВЛЕНИЯМИ

Линии с ответвлениями напряжением 35—220 кВ широко распространены в системах электроснабжения. К одной линии может подключаться до трех-четырех ответвительных подстанций, имеющих или не имеющих источники питания. Обычно они выполняются без выключателей со стороны высшего напряжения. Вместо них, как правило, предусматривается установка короткозамыка-

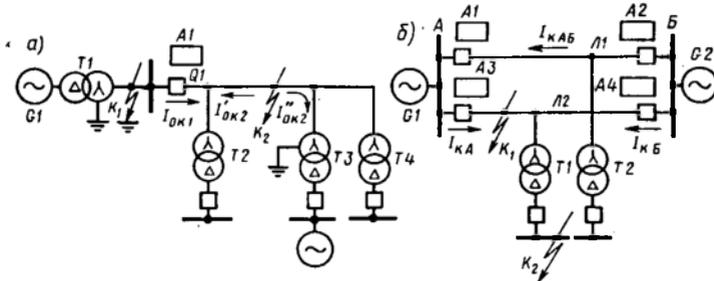


Рис. 14.7. Схемы линий с ответвлениями

телей и отделителей. Так подключаются, в частности, тяговые подстанции электрифицированных железных дорог [5]. Возможна также установка плавких предохранителей. Схемы с ответвлениями применяются на одиночных и на параллельных линиях с односторонним и двусторонним питанием (рис. 14.7). На линиях с ответвлениями используют те же устройства защиты и автоматики, что и на линиях без ответвлений, однако наличие ответвлений приводит к появлению обстоятельств, которые необходимо учитывать при выборе параметров защиты. В общем случае необходимы:

- отстройка от повреждений за трансформаторами ответвлений;
- отстройка от бросков тока намагничивания трансформаторов всех ответвительных подстанций;
- отстройка от самозапуска электродвигателей подстанций на ответвлениях;
- учет различия в токах по концам защищаемой линии при внешних к. з., когда к месту повреждения посылаются токи электродвигателей ответвительных подстанций.

Учет этих условий в ряде случаев затрудняет выполнение защиты, удовлетворяющей необходимым требованиям. Это обычно имеет место при наличии на подстанции мощных трансформаторов, особенно при наличии со стороны ответвления источников питания (рис. 14.7, а). Ниже рассматриваются некоторые общие особенности выполнения основных устройств защиты и автоматики линий с

ответвлениями. Наиболее полно эти особенности рассмотрены в [129].

Особенности релейной защиты. Токовые защиты. При выборе тока срабатывания токовой отсечки без выдержки времени на линии с односторонним питанием необходимо дополнительно учесть условия *a, б, в*, указанные выше, а также отстроится от токов, посылаемых электродвигателями ответвлений при трехфазных к. з. на шинах подстанции, на которой установлена токовая отсечка (точка K_1 на рис. 14.7, *a*). На линии с двусторонним питанием условия выбора тока срабатывания токовой отсечки такие же, как и на линии без ответвлений. Ток срабатывания максимальной токовой защиты выбирается, как и для линии без ответвлений, по условию (5.7), но при определении коэффициента самозапуска $k_{сзп}$ необходимо учитывать токи самозапуска электродвигателей всех подстанций на ответвлениях. Учет дополнительных условий при выборе параметров срабатывания токовой защиты может снизить ее чувствительность по сравнению с чувствительностью защиты на линии без ответвлений. Чувствительность снижается также из-за того, что значения токов в месте установки защиты при повреждении на линии с ответвлениями в ряде случаев могут быть меньше, чем на аналогичной линии без ответвлений. Для повышения чувствительности максимальную токовую защиту и токовую отсечку выполняют с пуском по напряжению; на линии с двусторонним питанием один из комплектов токовой отсечки дополняют органом направления мощности.

Токовая защита нулевой последовательности. Некоторые особенности защиты рассматриваются для случая установки ее на линии, на одной из ответвительных подстанций которой имеется источник питания (рис. 14.7, *a*). Если трансформаторы ответвлений имеют питание со стороны среднего или низшего напряжения, то хотя бы один из трансформаторов, подключенных к линии напряжением 110 кВ и выше, должен иметь глухозаземленную нейтраль, чтобы предотвратить повреждение изоляции трансформаторов при коротком замыкании на землю линии и отключении ее с питающих концов, имеющих заземленные нейтрали. При внешнем коротком замыкании на землю в точке K_1 (рис. 14.7, *a*) через защиту $A1$ линии идет ток нулевой последовательности $I_{0к1}$, от которого защиту необходимо отстраивать. Это снижает ее чувствительность. Кроме того, у рассматриваемой защиты по сравнению с защитой линии без ответвлений происходит снижение чувствительности из-за того, что при однофазном коротком замыкании в зоне действия (точка K_2) через защиту идет не весь ток нулевой последовательности, проходящий через место повреждения, а только его часть $I'_{0к2}$. Другая его часть $I''_{0к2}$ замыкается через заземленную нейтраль ответвления. В этих условиях защиту нулевой последовательности целесообразно выполнить направленной. Если на под-

станциях ответвлений отсутствуют источники питания, то нейтрали трансформаторов желательно не заземлять.

Дистанционные защиты. При выполнении защиты необходимо дополнительно обеспечить отстройку дистанционных органов I и II ступеней от к.з. за трансформаторами подстанций с учетом токораспределения на отдельных участках линии. Это приводит к сокращению зон действия первой и второй ступеней защиты (см. § 8.4). При выборе параметров срабатывания пусковых органов дополнительно необходимо учитывать условие отстройки от режима самозапуска электродвигателей всех подстанций, питающихся от защищаемой линии. При наличии питания со стороны ответвления на нем тоже устанавливается дистанционная защита. Так как на стороне высшего напряжения ответвительной подстанции могут отсутствовать трансформаторы напряжения, то цепи напряжения дистанционной защиты ответвления присоединяют к трансформатору напряжения со стороны среднего или низшего напряжения. Зоны действия защиты из-за этого сокращаются.

Дифференциальные защиты. Дополнительным условием при выборе токов срабатывания поперечных направленных и продольных дифференциальных защит является отстройка от коротких замыканий за трансформаторами ответвлений. В самом деле, при к.з. на линии (в точке K_1 на рис. 14.7, б) и при повреждении за трансформатором (в точке K_2) направления токов I_{KA} , I_{KB} и I_{KAB} на концах линий оказываются одинаковыми. И в том, и в другом случае поперечная дифференциальная направленная защита может подействовать на отключение линий Л2. Для исключения излишних срабатываний при к.з. в точке K_2 ток срабатывания $I_{с.зА}$ комплекта, установленного на подстанции А, и ток срабатывания $I_{с.зБ}$ комплекта, установленного со стороны подстанции Б, должны выбираться с учетом следующих условий:

$$\underline{I}_{с.зА} > (\underline{I}_{КА} - \underline{I}_{КАБ}) \text{ и } \underline{I}_{с.зБ} > (\underline{I}_{КБ} - \underline{I}_{КАБ}).$$

Кроме того, наличие ответвлений нарушает равенство токов параллельных линий в нормальном режиме, поэтому в реле защиты появляется ток, пропорциональной разности токов ответвлений, от которого защита также должна быть отстроена. Все это снижает чувствительность защиты. С увеличением числа ответвлений увеличиваются зоны каскадного действия. При использовании комбинированного пускового органа отстройку от к.з. за трансформатором обеспечивают выбирая параметр срабатывания минимального реле напряжения. В этом случае может быть достигнута необходимая чувствительность защиты по току. Однако не исключается отказ защиты по вине реле напряжения в режиме каскадного действия.

Дополнительные условия необходимо учитывать и при выборе тока срабатывания комплекта поперечной дифференциальной на-

правленной защиты нулевой последовательности. Так, если на одной из параллельных линий имеется ответвление, к которому подключен трансформатор с заземленной нейтралью, то ток срабатывания защиты необходимо отстраивать от тока небаланса при к.з. на землю на шинах подстанции *A* и *B* в режиме, когда трансформатор включен. При этом чувствительность защиты снижается по сравнению с чувствительностью защиты на аналогичных линиях без ответвления. Продольная дифференциальная защита сравнивает токи в начале и конце защищаемой линии. Соотношения между этими токами при повреждении на линии и при к.з. за трансформатором ответвления могут быть одинаковыми, поэтому для исключения излишних срабатываний ток срабатывания защиты отстраивается от тока в защите при повреждении за трансформатором. Это удается выполнить, если мощность трансформатора на ответвлении невелика. По мере увеличения мощности трансформаторов чувствительность защиты снижается.

Особенности автоматики линий с ответвлениями. При рассмотрении работы защиты и автоматики подстанций с короткозамыкателями и отделителями отмечалось, что после отключения подстанций отделителем от отключенной линии ее питание восстанавливается устройством АПВ. Устройства АПВ линий с ответвлениями выполняются по тем же схемам, что и на линиях без ответвлений. Однако необходимость применения однократного или многократного АПВ обуславливается уже не только согласованием УАПВ с релейной защитой линии, как указывалось выше (см. § 5.6), но и тем, какую схему имеет автоматика отключения отделителя и по какой схеме выполняется ответвление. Так, например, схема управления отделителем и короткозамыкателем, рассмотренная выше (см. § 14.2, рис. 14.5), позволяет на линии использовать однократное АПВ.

При наличии на линии транзитной подстанции (см. рис. 14.4, *в*) ее устройства АПВ, как отмечалось, выполняются двукратными: в первом цикле они пытаются восстановить питание за счет самоустранения повреждения на линии, а во втором цикле восстанавливают питание после отключения поврежденного участка. Принципиально этот участок можно отключать в бестоковую паузу однократного АПВ. Однако размыкать транзитную связь в первом цикле АПВ нецелесообразно, так как повреждения на линии могут самоустраняться.

Как указывалось выше (см. § 10.3), на линиях без ответвлений с двусторонним питанием может устанавливаться несинхронное УАПВ или УАПВ с контролем синхронизма. Если линия имеет ответвление с подключенной к нему местной электростанцией, мощность которой значительно меньше мощности нагрузки ответвления, то в ряде случаев УАПВ с контролем синхронизма применять невозможно из-за резкого торможения генераторов станции при отключении линии. Токи несинхронного включения также могут

оказаться недопустимо большими для генераторов местной станции, т. е. несинхронное АПВ тоже недопустимо.

В подобных случаях на подстанции ответвления устанавливают специальную противоаварийную автоматику [57], отделяющую от ответвления местную электростанцию с частью наиболее ответственной нагрузки. Питание остальной части нагрузки ответвления восстанавливается после действия устройства АПВ линии, имеющего обычное исполнение.

Глава 15

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

§ 15.1. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ И НЕНОРМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ ЗАЩИТАМ

Повреждения и защиты от них. К повреждениям, возникающим в обмотке статора электродвигателей переменного тока, относятся многофазные короткие замыкания, однофазные замыкания на землю и замыкания между витками одной фазы (витковые замыкания). Повреждениями синхронных электродвигателей и электродвигателей постоянного тока являются также обрывы в цепях возбуждения. Для синхронных электродвигателей представляют опасность замыкания на землю обмотки ротора.

Многофазные короткие замыкания всегда сопровождаются значительным возрастанием тока в поврежденном электродвигателе и понижением напряжения в питающей сети. Такие повреждения опасны не только для электродвигателя, но и для других неповрежденных электроприемников, поэтому на электродвигателях предусматривается быстродействующая защита от многофазных коротких замыканий в его обмотках и соединениях с коммутационным аппаратом, действующая на отключение.

Однофазное повреждение на землю в обмотке статора определяется режимом заземления нейтралей в питающей сети. Если нейтрали глухо заземлены, что обычно характерно для четырехпроводных сетей напряжением до 1 кВ, то ток однофазного короткого замыкания представляет опасность для поврежденного электродвигателя, поэтому и при таких повреждениях электродвигатель должен отключаться защитой без выдержки времени. Обычно это возлагается на защиту от многофазных коротких замыканий, выполняемой трехфазной. Специальную защиту от однофазных коротких замыканий на землю, как правило, не предусматривают.

В сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтральными однофазные замыкания на землю, как правило, непосредственной опасности для поврежденного электро-

двигателя и для системы электроснабжения в целом не представляют. Поэтому специальная защита от замыкания на землю, действующая на отключение, устанавливается на двигателях мощностью $P_d \leq 2$ МВт лишь в тех случаях, когда ток замыкания на землю $I_z \geq 10$ А. На электродвигателях мощностью $P_d > 2$ МВт такая защита предусматривается при токах замыкания на землю $I_z \geq 5$ А [3]. Однако, по некоторым данным, например [130], ток замыкания на землю $I_z \geq 5$ А представляет непосредственную опасность и для электродвигателей мощностью $P_d \leq 2$ МВт. Поэтому предлагается защиту электродвигателей независимо от их номинальной мощности выполнять одинаково. Опасность однофазных замыканий на землю заключается и в том, что они могут переходить в двойные замыкания на землю в разных точках. В этом случае значения токов повреждения могут достигать значения тока двухфазного к.з. Отключение электродвигателя при двойных замыканиях на землю возлагается обычно на защиту от замыкания на землю. Если она имеет выдержку времени, то в ее схему дополнительно вводят реле тока, срабатывающее при токах повреждения, равных 50—100 А, и отключающее электродвигатель без выдержки времени.

Витковые замыкания в обмотке опасны для электродвигателя в связи с тем, что наведенные в замкнутых витках тока могут намного превышать номинальный ток. При этом из-за теплоты, выделяемой в замкнутых витках, происходит повышенный нагрев магнитопровода и неповрежденной части обмотки и, как следствие, дальнейшее разрушение изоляции. Ток в неповрежденной части обмотки при витковых замыканиях изменяется незначительно, поэтому защиты, включенные на полные токи фаз, не могут использоваться для действия при таких повреждениях. Для этого в случае необходимости рекомендуется применять фильтровую токовую защиту [4]. Имеются и другие предложения. В частности, информацией о витковых замыканиях может служить фазовый сдвиг между токами электродвигателя [131]. На этой основе разработано импульсное устройство защиты, измеряющее интервал между импульсами, сформированными в момент перехода токов через нулевое значение. Защита действует также при несимметричных к.з.

Обрывы в цепях возбуждения синхронных электродвигателей происходят очень редко, поэтому защита от этих повреждений предусматривается только для некоторых мощных электродвигателей. Более вероятен обрыв в цепях возбуждения двигателей постоянного тока. При обрыве цепи возбуждения электродвигатель или тормозится (если на валу есть нагрузка), или чрезмерно повышает частоту вращения (незагруженный электродвигатель с независимым возбуждением или с параллельным самовозбуждением). И то, и другое нежелательно, так как при торможении значительно возрастает ток якоря, а работа с чрезмерной скоростью может привести к разрушению электродвигателя. Поэтому электро-

двигатели постоянного тока средней и большой мощности снабжаются защитой от обрыва цепи возбуждения.

Замыкание на землю обмотки ротора. Как и для турбогенераторов, опасно замыкание на землю во второй точке обмотки возбуждения синхронного электродвигателя. Его защита от этого вида повреждения может быть выполнена аналогично защите турбогенератора (см. § 12.5). Однако в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» такая защита необязательна.

Ненормальные режимы работы и защита от них. Все учитываемые ненормальные режимы работы электродвигателя сопровождаются прохождением сверхтока в его обмотке. Опасно прежде всего тепловое действие сверхтока, которое определяет допустимые значения и продолжительность прохождения сверхтока. Чем больше кратность k тока перегрузки относительно номинального тока, тем меньше допустимое время перегрузки $t_{пер} = A/(k^2 - 1)$, где A — коэффициент, зависящий от типа и исполнения электродвигателя. Для закрытых электродвигателей с большими массой и размерами $A \approx 250$; для открытых $A \approx 150$ [132].

Основными причинами возникновения сверхтоков являются технологические перегрузки приводимых во вращение механизмов, понижение напряжения в питающей сети и последующее его восстановление и обрыв одной фазы обмотки статора. Для синхронных электродвигателей причиной появления сверхтока является также асинхронный режим.

Сверхтоки технологической перегрузки. В условиях эксплуатации некоторые электродвигатели перегружаются приводимыми в движение механизмами. При недопустимой длительности перегрузки электродвигатель должен быть разгружен. Технологические перегрузки могут устраняться автоматически или обслуживающим персоналом без останова механизма или только после его останова (например, завал угля в дробилке), поэтому защита от перегрузки имеет выдержку времени и может выполняться с действием на автоматическую разгрузку механизма, на сигнал или на отключение электродвигателя.

Сверхтоки при понижении напряжения. Момент вращения $M_{вр}$ электродвигателя зависит от напряжения U_c на его выводах. Так, для асинхронного электродвигателя $M_{вр} = kU_c^2$, поэтому понижение напряжения U_c , например при коротком замыкании в питающей сети, приводит к снижению момента вращения и уменьшению числа оборотов электродвигателя. Он может даже остановиться, если вращающий момент станет меньше противодействующего момента механизма. Последующее восстановление нормальной работы (самозапуск) при возрастании напряжения после отключения короткого замыкания сопровождается прохождением по обмоткам сверхтоков самозапуска. Токи самозапуска для большинства электродвигателей опасности не представляют, так как режим самозапуска кратковременен. Однако при одновременном самоза-

пуске многих электродвигателей, подключенных к одной и той же сети, в ряде случаев начальное значение восстанавливающегося напряжения оказывается $U_{\text{ост.сэп}} < (0,55 \dots 0,7) U_{\text{ном}}$, что затрудняет восстановление нормальной работы. Поэтому часть менее ответственных электродвигателей при понижении напряжения должна отключаться минимальной защитой напряжения, чтобы облегчить самозапуск более ответственных электродвигателей. При недостаточной мощности источника питания наряду с неответственными необходимо отключать и часть ответственных механизмов. Они обратно включаются устройством АПВ по окончании самозапуска неотключенных электродвигателей. Минимальную защиту напряжения необходимо также устанавливать на электродвигателях механизмов, самозапуск которых недопустим по условиям технологического процесса или по условиям техники безопасности.

Сверхтоки при обрыве фазы. Сверхтоки, вызываемые обрывом фазы, наиболее часто возникают при защите электродвигателя или его питающей сети плавкими предохранителями. При этом вращающий момент уменьшается. Поведение работающего электродвигателя после обрыва фазы (работа с пониженной скоростью или торможение) зависит от противодействующего момента механизма. Если к сети с оборванной фазой подключается неподвижный электродвигатель, то, поскольку он развернуться не может, по его обмотке может длительно проходить опасный для него начальный пусковой ток. Перегорание предохранителя в одной фазе или нарушение контакта в одном полюсе коммутационного аппарата при правильном выборе предохранителей и высокой культуре эксплуатации электрооборудования происходят очень редко. Поэтому обычно специальная защита от работы электродвигателя на двух фазах не устанавливается, а ее функции выполняют другие защиты от перегрузок. Применение защиты от обрыва фазы оправдано, если электродвигатель работает в длительном режиме с большой нагрузкой без постоянного наблюдения персонала, а повреждение электродвигателя влечет за собой существенный ущерб [3].

Необходимо заметить, что токовые защиты от перегрузки часто отказывают в действии при обрыве фазных проводов. Этим объясняются многочисленные предложения по совершенствованию существующих и разработке новых устройств защиты от обрыва проводов и перегрузки [133, 134, 135]. Очевидно, наиболее универсальной защитой электродвигателей напряжением до 1 кВ от всех ненормальных режимов, сопровождающихся возрастанием тока и в связи с этим интенсивным нагревом электродвигателя, является встроённая температурная защита [136, 137].

Сверхтоки синхронных электродвигателей при асинхронном режиме. Из рассмотренного упрощенного выражения момента вращения синхронного электродвигателя $M_{\text{вр}} = (kE_q U_c / X_d) \sin \delta$ следует, что устойчивая работа синхронного

электродвигателя возможна только при механических нагрузках, при которых угол δ между напряжением сети \underline{U}_c и ЭДС электродвигателя E_d не превышает $\pi/2$. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается переходом за угол $\pi/2$, снижением момента вращения и возникновением асинхронного режима. Причиной уменьшения момента вращения и возникновения в связи с этим асинхронного режима являются также снижение напряжения U_c и уменьшение тока возбуждения электродвигателя. При асинхронном режиме ток статора возрастает, а ротор и приводимый в движение механизм подвергаются действию знакопеременного момента, что может привести к их повреждению.

Синхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ не имеют специальной защиты от асинхронного режима. Ее функции, как правило, выполняют защиты от перегрузки по току статора. Специальная защита предусматривается на синхронных электродвигателях напряжением выше 1 кВ. Ее стремятся выполнить с действием на устройства, восстанавливающие синхронную работу электродвигателя, например на устройство ресинхронизации или на автоматическую разгрузку механизма. Защита может действовать и на отключение с повторным автоматическим пуском. При невозможности ресинхронизации или разгрузки электродвигателя защита действует на отключение. Во всех случаях ее выполняют с выдержкой времени.

Опасно для синхронных электродвигателей также и несинхронное включение, которое может иметь место при работе устройств АПВ и АВР источников питания. Для двигателей, не допускающих такого включения, предусматривается защита, отключающая их при выявлении факта потери питания. Действие защиты может сопровождаться не отключением электродвигателей, а их ресинхронизацией.

Защиты электродвигателей выполняются на основе отдельных электромеханических и полупроводниковых реле. Эти защиты обычно нечувствительны к неполнофазным режимам, к витковым замыканиям, они не учитывают возможности появления ряда режимов опасных для электродвигателей, таких, например, как процесс старения изоляции, недовозбуждение и перевозбуждение синхронных электродвигателей, перенапряжения и др. [138]. В связи с этим ведутся работы по созданию специализированных комплектов релейной защиты отдельных объектов, более точно учитывающих режимы работы и перегрузочные характеристики защищаемого оборудования. Для электродвигателей выше 1 кВ такой защитой является, например, многофункциональное устройство ЗРКД1 [139]. Оно предназначено для защиты при следующих аварийных и ненормальных режимах работы электродвигателя: междуфазных к. з. на выводах и в обмотке, замыканиях на землю, в том числе двойных замыканиях; витковых замыканиях обмоток статора, обрывах фазы

статора; перегрузках; асинхронном режиме синхронного электродвигателя; снижениях напряжения питающей сети и потере питания.

При повреждении электродвигателя ответственного механизма может нарушаться технологический процесс, что в ряде случаев недопустимо. Технологический процесс не нарушится, если ввести в работу резервный механизм. Для этого применяют устройство АВР электродвигателя резервного механизма. Оно действует не только при отключении электродвигателя основного механизма, но и при недопустимом отклонении параметров технологического процесса.

§ 15.2. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ

Для асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ предусматриваются устройства релейной защиты, действующие при: многофазных коротких замыканиях на выводах и в обмотках статора; перегрузках, вызванных технологическими причинами и затянувшимся пуском или самозапуском; исчезновении или длительном снижении напряжения. В необходимых случаях должна устанавливаться защита от однофазных замыканий на землю. Обычно эти защиты выполняются с помощью вторичных реле прямого действия или реле косвенного действия на оперативном переменном токе. Наряду с защитой электродвигателя снабжаются устройствами АПВ и АВР.

Защита от многофазных коротких замыканий. Для защиты от многофазных коротких замыканий применяются плавкие предохранители, токовые отсечки без выдержки времени и продольные дифференциальные защиты.

Плавкие предохранители могут быть использованы при подключении электродвигателя к сети через выключатель нагрузки. Предохранитель должен удовлетворять условиям (11.1) и (11.2). При этом в качестве максимального рабочего тока $I_{\text{раб max}}$ берется номинальный ток электродвигателя $I_{\text{д ном}}$, а ток кратковременной перегрузки $I_{\text{пер}}$ принимается равным пусковому току $I_{\text{пск}}$ электродвигателя. Чувствительность предохранителей должна удовлетворять требованиям, изложенным в § 11.3.

Токовая отсечка без выдержки времени устанавливается на электродвигателях мощностью $P_{\text{д}} < 5000$ кВт, причем для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} < 2000$ кВт она выполняется однорелейной, с включением реле на разность токов двух фаз. Если чувствительность отсечки оказывается недостаточной ($k_{\text{ч}} \leq 2,0$ при металлическом коротком замыкании на выводах обмотки статора) или если привод выключателя имеет два реле тока прямого действия, то применяют двухрелейную отсечку, которая является обязательной для электродвигателей мощностью $P_{\text{д}} > 2000$ кВт. Если

на электродвигателях мощностью $P_d > 2000$ кВт отсутствует защита от однофазных замыканий на землю, то их отключение при двойных замыканиях на землю возлагается на токовую отсечку. В таком случае она выполняется трехфазной трехрелейной. Возможные схемы токовых отсечек электродвигателей мощностью $P_d < 2000$ кВт показаны на рис. 15.1. В первых двух схемах (рис. 15.1, а, б) применяются реле тока KA прямого действия и реле с переключающим контактом, дешунтирующим электромагнит отключения YAT . Применение насыщающегося трансформатора тока TLA в третьей схеме

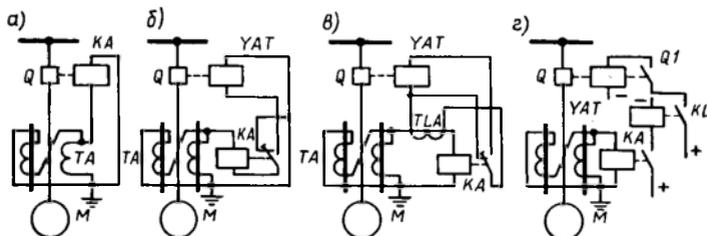


Рис. 15.1. Токовая отсечка на переменном и постоянном оперативном токе

ме (рис. 15.1, в) и промежуточного реле KL в последней схеме (рис. 15.1, г) необходимо для уменьшения нагрузки на контакты реле тока. Ток срабатывания реле токовой отсечки выбирается с учетом отстройки от максимального пускового тока $I_{пск\ max}$ при выведенных пусковых устройствах по условию

$$I_{с.р}^I = k_{отс}^I k_{сх}^{(3)} I_{пск\ max} / K_I. \quad (15.1)$$

При этом коэффициент отстройки берут в пределах $k_{отс}^I = 2 \dots 2,5$ для реле прямого действия; $k_{отс}^I = 1,8 \dots 2,0$ для электромагнитного элемента индукционных реле РТ-80; $k_{отс}^I = 1,4 \dots 1,5$ для электромагнитных реле РТ-40. Чувствительность отсечки считается достаточной, если при двухфазных коротких замыканиях на выводах электродвигателя коэффициент чувствительности $k_{ч} \geq 2,0$.

Продольная дифференциальная защита устанавливается на электродвигателях мощностью $P_d \geq 5000$ кВт и меньше, если токовая отсечка оказывается недостаточно чувствительной. Для упрощения защита выполняется двухфазной. В трехфазном исполнении она рекомендуется только если двигатели мощностью $P_d \geq 5000$ кВт не имеют быстродействующей защиты от замыкания на землю.

Схемы дифференциальной защиты электродвигателя выполняются аналогично схемам дифференциальной защиты генератора (см. рис. 12.2 и 12.3). Ток срабатывания продольной дифференци-

альной защиты, в том числе и электродвигателя, должен отстраиваться от максимального тока небаланса $I_{\text{нб.реч.мах}}$. Наибольшего значения ток небаланса достигает при пусках электродвигателя. Поэтому, определяя $I_{\text{нб.реч.мах}}$ по выражению (9.4), необходимо вместо $I_{\text{к.вн.мах}}^{(3)}$ взять пусковой ток электродвигателя, который связан с его номинальным током. Это позволяет ток срабатывания защиты выразить через номинальный ток электродвигателя $I_{\text{с.з}} = k_{\text{отс}} I_{\text{д.ном}}$. Расчеты показывают, что коэффициент отстройки при условии идентичности трансформаторов тока и допустимой полной погрешности составляет $k_{\text{отс}} = 1,4 \dots 2,0$ для защиты с реле РТМ и РТ-40 и $k_{\text{отс}} = 0,5 \dots 1,1$ для защиты с реле РНТ. Однако опыт эксплуатации дифференциальных защит показывает, что при таких значениях $k_{\text{отс}}$ имели место срабатывания защиты с реле РНТ при пусках и самозапущах мощных электродвигателей [138].

В результате исследования обнаружено, что ток небаланса практически не содержит аperiodической составляющей и достигает значения номинального тока двигателя. Поэтому $k_{\text{отс}}$ для реле РНТ в ряде случаев приходится выбирать таким же, как и для реле РТ-40. Для повышения чувствительности защиты целесообразно использовать реле с торможением. Реле ДЗТ-11 позволяет принимать минимальный ток срабатывания защиты при отсутствии торможения $(0,75 \dots 1,4) I_{\text{д.ном}}$. На электродвигателе может быть использована также защита, входящая в комплект устройства ЯРЭ-2201 (см. § 3.5), при этом минимальный ток срабатывания можно снизить до $0,5 I_{\text{д.ном}}$.

Защита от замыканий на землю. Она предусматривается на электродвигателях соответствующей мощности, если токи замыкания на землю достигает указанных выше (см. § 15.1) значений. Реле защиты подключается к однотрансформаторному фильтру тока нулевой последовательности. Если число кабелей, соединяющих распределительное устройство с электродвигателем, больше трех, то используются трансформаторы тока нулевой последовательности с подмагничиванием переменным током (см § 1.7). При выполнении схемы и выборе параметров защиты руководствуются положениями, изложенными выше (см. § 7.2).

Для определения тока срабатывания используют условие (7.6), вводя в него вместо тока $I_{\text{од}}^{(1)}$ собственный емкостный ток электродвигателя $I_{\text{од}}^{(1)}$. Ток, выражаемый в амперах, можно определить, используя выражение (7.2):

$$I_{\text{од}}^{(1)} = \omega C_{\text{д}} U_{\text{ном.ф}}, \quad (15.2)$$

где $U_{\text{ном.ф}}$ — номинальное фазное напряжение электродвигателя, В; $C_{\text{д}}$ — емкость фазы электродвигателя, Ф.

Значение емкости сообщается заводом-изготовителем электродвигателей. При отсутствии таких данных значение емкости (Ф/фазу) ориентировочно определяют по формулам [140]:

для неявнополюсных синхронных и асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором

$$C_d = \frac{0,0187 S_{д.ном} \cdot 10^{-6}}{1,2\sqrt{U_{ном}} (1 + 0,08U_{ном})}, \quad (15.3)$$

где $S_{д.ном}$ — номинальная мощность электродвигателя, МВ·А;
 $U_{ном}$ — номинальное линейное напряжение, кВ;
 для остальных электродвигателей

$$C_d = \frac{40S_{д.ном}^{3/4} \cdot 10^{-6}}{3(U_{ном} + 3600) n_{д.ном}^{1/3}}, \quad (15.4)$$

где $S_{д.ном}$ — кВ·А; $U_{ном}$ — В; $n_{д.ном}$ — номинальная частота вращения ротора, об/мин.

Защиту следует выполнять без выдержки времени, а отстройку от токов переходного процесса обеспечивать выбором коэффициентов отстройки. Ток срабатывания при этом не должен превышать 10 А для электродвигателей мощностью $P_d \leq 2000$ кВт и 5 А для электродвигателей мощностью $P_d > 2000$ кВт [3]. Если эти требования не обеспечиваются, то защиту приходится выполнять с выдержкой времени и вводить в ее схему, как отмечалось выше, дополнительное реле тока с первичным током срабатывания 50—100 А для отключения двойных замыканий на землю без выдержки времени. Для выполнения защиты от замыкания на землю электродвигателей мощностью до 2000 кВт, как правило, применяют реле РТ-40/0,2. На электродвигателях большей мощности защиту рекомендуется выполнять с применением полупроводникового реле тока повышенной чувствительности РТЗ-51. При недостаточной чувствительности токовых защит следует использовать токовую направленную защиту ЗЗП-1.

Защита от перегрузки. В соответствии с [3] защита от перегрузки предусматривается на электродвигателях, подверженных перегрузке по технологическим причинам, а также на электродвигателях с особо тяжелыми условиями пуска и самозапуска длительностью 20 с и более. Перегрузка является симметричным режимом, поэтому защита от нее может быть выполнена одним реле, включенным в любую фазу электродвигателя. Выдержка времени защиты отстраивается от длительности пуска электродвигателя в нормальных режимах и самозапуска после действия УАВР и УАПВ, при этом наиболее удобны характеристики тепловых и индукционных реле. На электродвигателях напряжением выше 1 кВ электро-тепловая защита применяется относительно редко из-за недостатков, присущих электротепловым реле. Защита от перегрузки обычно осуществляется индукционными элементами реле РТ-80, электромагнитные элементы которых используются для выполнения токовой отсечки. Таким образом, с помощью комбинированных реле РТ-80 осуществляется двухступенчатая токовая защита. Количе-

ство реле и схемы их соединения определяются требованиями, предъявляемыми к защите от коротких замыканий — токовой отсечке. Если при этом защита от перегрузки должна действовать на сигнал, то применяются реле РТ-84 с отдельными контактами индукционного и электромагнитного элементов. Действие защиты на отключение допускается на электродвигателях с тяжелыми условиями пуска или самозапуска, а также в тех случаях, когда отсутствует возможность своевременной разгрузки без остановки электродвигателей или если нет постоянного дежурного персонала. Учитывая сказанное, ток срабатывания реле выбирают исходя из следующих требований: реле не должно срабатывать в нормальном режиме работы электродвигателя, т. е.

$$I_{с.р}^{III} \geq k_{отс}^{III} k_{сх}^{(3)} I_{л.ном} / (k_{н} K_I); \quad (15.5)$$

реле должно приходить в действие при пусках электродвигателя, т. е.

$$I_{с.р}^{III} \leq 0,75 k_{сх}^{(3)} I_{нск} / K_I. \quad (15.6)$$

В расчетах принимают значения $k_{отс}^{III} = 1,1 \dots 1,2$ и $k_{н} = 0,8$. При этом несрабатывание защиты в нормальных режимах пуска и самозапуска обеспечивается выбором выдержки времени в независимой части характеристики $t_{с.з}^{III} = 10 \dots 15$ с. Нашей промышленностью выпускается также полупроводниковое реле с зависимой характеристикой выдержки времени в составе комплектных устройств ЯРЭ-2201 [141]. Защита от перегрузки может выполняться и с независимой от тока выдержкой времени.

Минимальная защита напряжения. В общем случае защита выполняется двухступенчатой. Первая ступень предназначена для облегчения самозапуска ответственных электродвигателей, она отключает электродвигатели неответственных механизмов. Напряжение срабатывания первой ступени устанавливается примерно равным $U_{с.з}^I = 0,7 U_{ном}$, а выдержка времени принимается на ступень селективности больше времени действия быстродействующих защит от многофазных коротких замыканий; $t_{с.з}^I = 0,5 \dots 1,5$ с. Вторая ступень защиты отключает часть электродвигателей ответственных механизмов, самозапуск которых недопустим по условиям техники безопасности или из-за особенностей технологического процесса. Напряжение срабатывания второй ступени не превышает $U_{с.з}^{II} = 0,5 U_{ном}$, а выдержка времени принимается $t_{с.з}^{II} = 10 \dots 15$ с. Схемы минимальной защиты напряжения выполняются таким образом, чтобы исключить ее ложное действие при нарушениях во вторичных цепях трансформаторов напряжения.

Наиболее простая однорелейная схема защиты — применяется только при использовании реле прямого действия РНВ. Одна из таких схем показана на рис. 15.2 [132]. В схеме используются минимальные реле напряжения *KVT1—KVT4*, установленные на четырех электродвигателях *M1—M4*. Для повышения надежности в схеме защиты:

фаза *b* цепей напряжения заземлена не наглухо, а через пробивной предохранитель *FV*, поэтому при однофазных замыканиях на землю фаз *a* и *c* установленные в цепях автоматические выключатели *SF1* и *SF2* не отключаются;

приборы и счетчики подключены к цепям напряжения через отдельный автоматический выключатель *SF3* с мгновенным расцепителем, поэтому короткие замыкания в цепях измерительных приборов устраняются раньше, чем сработают реле *KVT*;

между фазами *a* и *c* включен конденсатор емкостью $C = 30$ мкФ, через который подается напряжение на соответствующее реле *KVT* после отключения

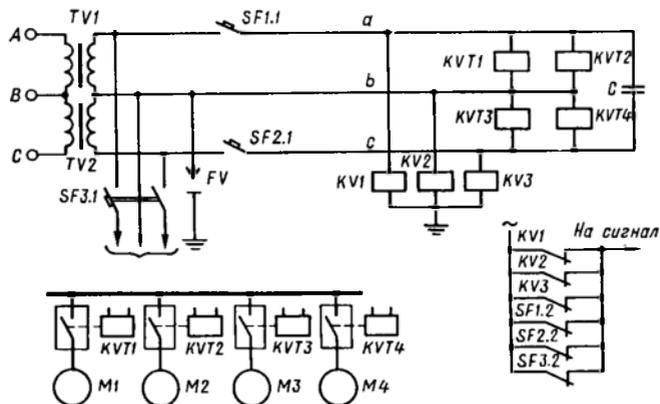


Рис. 15.2. Минимальная защита напряжения электродвигателей напряжением выше 1 кВ

автоматического выключателя *SF1* или *SF2* при двухфазных коротких замыканиях в цепях защиты; при замыкании между фазами *a* и *b* или *a* и *c* отключается автоматический выключатель *SF1*, имеющий мгновенный расцепитель (автоматический выключатель *SF2* имеет тепловой расцепитель и при замыкании между фазами *a* и *c* отключиться не успевает), и напряжение на реле *KVT1* и *KVT2* при этом поступает через конденсатор *C* от фазы *c*; при замыкании между фазами *b* и *c* отключается автоматический выключатель *SF2* и напряжение на реле *KVT3* и *KVT4* поступает через конденсатор *C* от фазы *a*; подаваемого через конденсатор напряжения достаточно для возбуждения реле *KVT*, поэтому ложного действия защиты не происходит.

Сигнализация неисправности цепей напряжения осуществляется контактами реле напряжения *KV1—KV3* и вспомогательными контактами автоматических выключателей *SF1—SF3*.

Минимальная защита напряжения с реле косвенного действия выполняется обычно групповой, т. е. действующей на отключение группы двигателей. Наиболее проста и наименее надежна схема с одним реле в каждой ступени, включенным на междуфазное напряжение. Более надежны схемы с двумя реле, питаемыми от разных трансформаторов напряжения либо от разных междуфазных напряжений одного трансформатора напряжения, а также трехрелейные.

Устройства АПВ и АВР. Устройства АПВ предусматриваются на ответственных электродвигателях, отключаемых минимальной защитой напряжения для обеспечения самозапуска других ответ-

В общих цепях УАВР (рис. 15.4, а) возбуждено реле *КВ* запрета автоматики, обеспечивающее однократность действия УАВР. Его контактом *КВ* подготавливается цепь обмотки реле включения резерва *КСС*. При аварийном отключении рабочего электродвигателя в цепях его управления замыкается цепь несоответствия, образованная контактом *SA2.3* ключа *SA2* и вспомогательным контактом выключателя *Q1.5* в цепи обмотки реле *КQТ1*. Реле срабатывает и контактом *КQТ1.1* размыкает цепь автоматического пуска электродвигателя, а контактом *КQТ1.2* замыкает цепь аварийной сигнализации. В общих цепях схемы УАВР реле контактом *КQТ1.3* размыкает цепь обмотки реле блокировки *КВ*

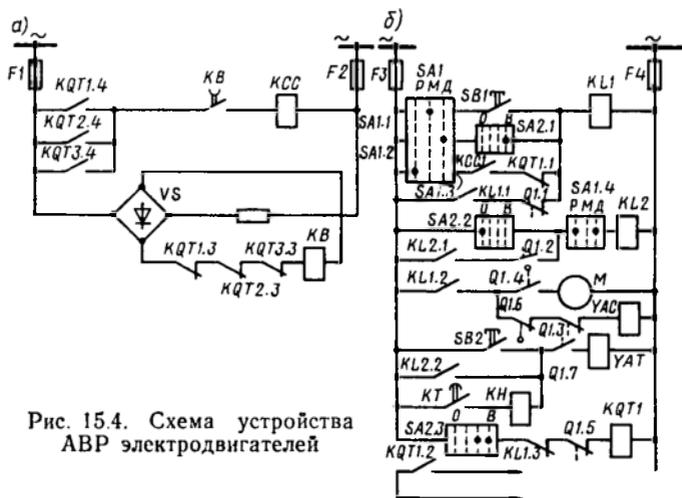


Рис. 15.4. Схема устройства АВР электродвигателей

и контактом *КQТ1.4* замыкает цепь обмотки реле включения резерва *КСС*. Реле срабатывает и замыкает контакты *КСС* в цепях управления всех электродвигателей. Однако при этом замкнутой оказывается только цепь обмотки реле *КЛ1* в схеме резервного электродвигателя (контакт *SA1.3* ключа *SA1* и контакты реле *КСС1* и *КQТ1.1*), которое после срабатывания самоудерживается контактом *КЛ1.1* и подает (контактом *КЛ1.2*) напряжение на электродвигатель *М*, заводящий пружины привода. По окончании завода пружин конечный выключатель *Q1.4* отключает электродвигатель *М*, вспомогательный контакт готовности привода *Q1.6* замыкает цепь электромагнита включения *YAC* и выключатель резервного электродвигателя включается. При этом самоудерживание реле *КЛ1* прекращается (размыкается контакт *Q1.1*). Промежуточное реле *КЛ2* действует в случае дистанционного отключения электродвигателя.

Все электродвигатели имеют защиту от перегрузки, выполненную на переменном оперативном токе (реле тока с зависимой характеристикой, контакт *КТ* которого и указательное реле *КН* показаны на рис. 15.4, б). Защиты от коротких замыканий и от понижения напряжения выполняются с помощью реле прямого действия, встроенных в приводы выключателей (на рис. 15.4 не показаны).

§ 15.3. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ВЫШЕ 1 кВ

Релейная защита. Для синхронных электродвигателей предусматриваются те же защиты, что и для асинхронных, однако при выборе параметров токовой отсечки и продольной дифференциаль-

ной защиты учитываются дополнительные условия. Кроме того, синхронные электродвигатели должны иметь защиту от асинхронного режима и защиту от потери питания. При наличии устройств АГП защиты, действующие на отключения электродвигателя, должны действовать также на УАГП.

Токовая отсечка. При выборе тока срабатывания наряду с условием (15.1) необходимо обеспечить отстройку от сверхпереходного тока I_d'' , посылаемого электродвигателем в точку повреждения при трехфазном к. з. на шинах, к которым он подключен. Для определения тока срабатывания в выражение (15.1) необходимо вместо $I_{\text{пск макс}}$ ввести значение тока $I_d'' = (E_q''/X_d'')I_{\text{д.ном}}$, где E_q'' и X_d'' — сверхпереходные ЭДС и сопротивление электродвигателя. Если электродвигатель подключен к шинам через постоянно включенный реактор с сопротивлением X_p , то при определении тока I_d'' необходимо принимать $(X_d'' + X_p)$.

Продольная дифференциальная защита. Как и для токовой отсечки, при выборе тока срабатывания продольной дифференциальной защиты необходимо исключить ее действие не только при пусках электродвигателя, но и при внешних коротких замыканиях. В этом случае, определяя максимальный расчетный ток небаланса по выражению (9.4), необходимо вместо $I^{(3)}_{\text{кв.н макс}}$ взять ток I_d'' .

Защита от потери питания. При потере питания и действии устройств АПВ и АВР происходит несинхронное включение синхронных электродвигателей. Ток несинхронного включения может значительно превышать значение пускового тока, поэтому такие включения не всегда допустимы по условию предотвращения повреждения электродвигателя. Кроме того, при несинхронном включении возбужденного электродвигателя снижается вероятность его ресинхронизации. Из сказанного следует, что при потере питания может возникнуть необходимость отключать синхронные электродвигатели или снимать с них возбуждение с последующей ресинхронизацией. Это возлагается на защиту от потери питания, рассмотренную выше (см. § 13.9).

Защита от асинхронного режима. Ее выполняют одним из следующих способов [3]: с помощью реле, реагирующего на увеличение тока в обмотке статора; с помощью устройства, реагирующего на появление переменного тока в обмотке ротора; с помощью устройства, действующего на принципе отсчета числа электрических проворотов ротора при асинхронном режиме. Известны и другие способы.

Распространение получила защита, реагирующая на увеличение тока в обмотке статора. При асинхронном режиме в обмотке статора проходит уравнивающий ток, действующее значение которого

$$I_{yp} = [2U_c I(X'_c + X'_d)] \sin(\delta/2).$$

Это выражение получено в предположении, что ЭДС системы и электродвигателя равны напряжению сети U_c , а в расчетную схему входят переходное сопротивление электродвигателя X'_d и переходное сопротивление системы X'_c .

Характер изменения тока I_{yp} в зависимости от угла δ показан на рис. 15.5, а, из которого следует, что если от асинхронного режима использовать максимальную токовую защиту с независимой выдержкой времени, то она не будет действовать, так как измерительное реле тока периодически размыкает контакты и в пределах каждого цикла биения держит их разомкнутыми в течение времени Δt . Поэтому для обеспечения бесперебойной подачи напряжения на обмотку реле времени в схему защиты вводят промежуточное реле KLT с замедлением при возврате (рис. 15.5, б).

Время возврата $t_{в.р}$ принимают большим, чем время Δt . Применяется защита в однофазном исполнении. Ток срабатывания защиты принимается $I_{с.з} = (1,3 \dots 1,4) I_{д.ном}$. При выборе выдержки времени должно соблюдаться условие $t_{в.р} = (1,2 \dots 1,5) \Delta t$.

Для электродвигателей с отношением короткого замыкания (ОКЗ), равным единице и более, можно использовать защиту с зависимой характеристикой выдержки времени. Для ее выполнения достаточно иметь одно реле РТ-80. При возникновении асинхронного режима оно приходит в действие и в течение времени Δt не успевает возвратиться. Поэтому по истечении некоторого времени реле срабатывает. Функции защиты от асинхронного режима может также выполнять защита от перегрузки. Если защита от асинхронного режима осуществляет ресинхронизацию электродвигателя, то предусматривается такая последовательность операций: снятие с электродвигателя возбуждения и перевод его в асинхронный режим, подача возбуждения после достижения ротором электродвигателя подсинхронной частоты вращения.

Рассмотренные защиты от асинхронного режима могут допускать ложные срабатывания при резкопеременных нагрузках на валу электродвигателя, вследствие того что характер изменения тока статора и тока ротора при этом мало отличается от характера изменения токов при асинхронном режиме. Предложены за-

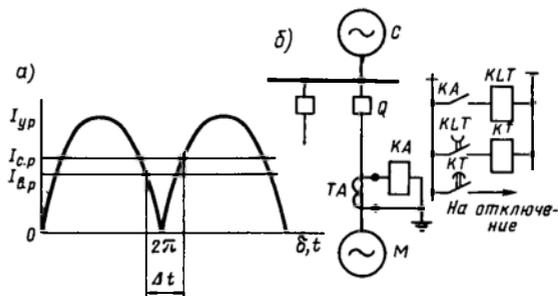


Рис. 15.5. Защита синхронного электродвигателя от асинхронного режима

щиты, способные выявить асинхронный режим и при резкопеременных ударных нагрузках. Такой, например, является защита, реагирующая на изменение угла между векторами напряжения сети и ЭДС электродвигателя [142]. Наряду с ложными срабатываниями при резкопеременных нагрузках на валу электродвигателя защита, реагирующая на увеличения тока в обмотке статора, не всегда удовлетворяет требованиям чувствительности. В связи с этим предложена импульсная защита, основанная на контроле фазового угла тока статора [143]. В синхронном режиме этот угол не превышает $\pm 25^\circ$. При нарушении синхронизма он значительно возрастает. Экспериментально определена угловая зона срабатывания защиты. Она принята от 30 до 90° . Защита, выполненная с использованием указанного принципа, рассмотрена также в [138].

Устройства автоматики. Устройства противоаварийной автоматики (УАПВ и УАВР) синхронных электродвигателей работают в несколько иных условиях, чем аналогичные устройства асинхронных электродвигателей. При действии УАПВ и УАВР происходит несинхронное включение синхронных электродвигателей, сопровождающееся токами, которые могут значительно превышать пусковой ток. Поэтому перед включением электродвигателя производится частичное гашение его поля, с тем чтобы напряжение на его выводах не превышало $U_d < (0,5 \dots 0,6) U_{ном}$ [121]. Если расчеты показывают, что кратности тока и момента при несинхронном включении не превышают допустимых значений, то устройства АПВ и АВР могут включать электродвигатель при полном возбуждении. Действия устройств АПВ и АВР согласуются с действием защиты от потери питания.

Устройства автоматического регулирования возбуждения [144]. Системы возбуждения синхронных электродвигателей выполняют аналогично системам возбуждения синхронных генераторов (см. § 12.8). Систему возбуждения выбирают на основе технико-экономического анализа. Для электродвигателей средней мощности предпочтительнее система возбуждения с полупроводниковыми выпрямителями перед системой возбуждения с генератором постоянного тока. Бесщеточная система возбуждения рекомендуется для электродвигателей, работающих во взрывоопасных и сильно запыленных помещениях.

На синхронных электродвигателях обязательно предусматриваются устройства автоматического регулирования возбуждения. Они выполняются в основном на тех же принципах, что и УАРВ генераторов. Однако задачами УАРВ синхронных электродвигателей в общем случае являются как поддержание заданного напряжения на шинах подстанции, так и поддержание других параметров: заданного коэффициента мощности $\text{tg } \varphi$, отдаваемой реактивной мощности. Для различных условий работы и разных систем возбуждения разработан ряд схем УАРВ. В простейшем случае это устройство релейной форсировки.

Для электродвигателей с непрерывно изменяющейся реактивной нагрузкой и электромашинным возбуждением рекомендуется осуществлять компаундирование с коррекцией напряжения и коэффициента мощности ($\text{tg } \varphi$), а также автоматически ограничивать возбуждение, если напряжение ротора или ток статора достигают максимально допустимых значений. Компаундирование с коррекцией напряжения уже рассматривалось (см. § 12.9). Корректором коэффициента мощности может служить схема сравнения абсолютных значений двух величин (см. § В.3 и § 3.3), так как направление ее выходного тока зависит от угла φ . Этот ток подается в обмотку управления магнитного усилителя AL , входящего в электромагнитный корректор напряжения (см. рис. 12.23, а). Схема настраивается на отсутствие выходного тока при соответствии $\text{tg } \varphi$ заданному значению, отклонение от которого приводит к изменениям выходного тока регулятора в необходимую сторону.

Принципиальная схема, осуществляющая ограничение напряжения возбуждения (ротора) U_n и тока статора I_d , приведена на рис. 15.6, а. В зависимости от того, какое из напряжений, U_n или $U_1 = kI_{d2}$, является большим, оно подается на вход элемента задержки по времени AT . Меньшее напряжение на вход AT не поступает, так как соответствующий диод $VD1$ или $VD2$ в цепи меньшего напряжения закрыт.

Задержка по времени необходима для того, чтобы ограничитель не препятствовал кратковременной форсировке возбуждения. Выходное напряжение AT сравнивается с напряжением U_c сети на входе магнитного усилителя $AL1$, выход которого через выпрямитель $VS4$ соединен с выпрямителем $VS1$ тока нелинейного эле-

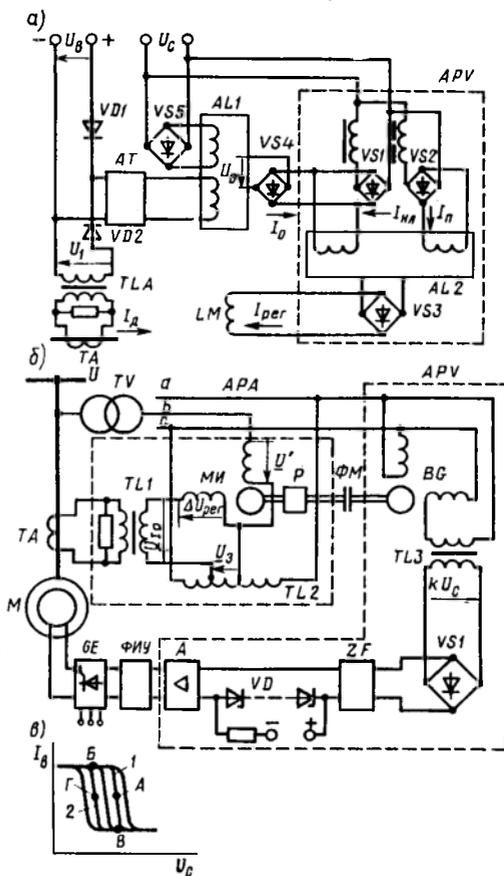


Рис. 15.6. Схемы устройства APB синхронных электродвигателей

мента электромагнитного корректора напряжения APV .

В нормальном режиме работы выходное напряжение ограничителя U_0 невелико, поэтому диоды выпрямителя $VS4$ закрыты, а диоды $VS1$ открыты. Магнитный усилитель $AL2$ управляется разностью токов $I_d - I_{пл}$. При достижении предельно допустимых значений U_b или I_d напряжение U_0 возрастает, открывая диоды выпрямителя $VS4$ и закрывая диоды $VS1$. После этого магнитный усилитель $AL2$ начинает управляться разностью токов $I_d - I_0$. Возрастающему току I_0 соответствует снижение тока регулятора $I_{рег}$, подводимого к обмотке возбуждения LM .

Для синхронных электродвигателей большой мощности с резко изменяющейся нагрузкой и тиристорной системой возбуждения разработано устройство АРВ (рис. 15.6, б), имеющее разные характеристики относительно длительных и кратковременных изменений напряжения. Оно содержит регулятор APV напряжения (РН) и регулятор APA реактивного тока (PPT), причем основную роль в регулировании играет быстродействующий РН, а замедленный PPT лишь изменяет задание (уставку) РН при длительных снижениях напряжения сети U_c . В состав УАРВ входит также блок регулирования по первой производной активной составляющей тока статора (на рис. 15.6, б не показан). Измерительный орган регулятора напряжения имеет промежуточный трансформатор $TL3$, установочный (задающий) элемент в виде бесконтактного сельсина BG , включенного по схеме поворотного трансформатора, выпрямитель $VS1$, сглаживающий фильтр ZF и элемент сравнения выпрямленного напряжения kU_c с напряжением на стабилитронах VD . Разность указанных напряжений, увеличенная в усилителе A , подается на фазоимпульсное устройство $ФИУ$, которое путем изменения угла регулирования тиристоров возбудителя GE изменяет ток возбуждения электродвигателя M . Привод сельсина BG осуществляется через фрикционную муфту FM и редуктор P с большим передаточным числом от двухфазного электродвигателя MI , являющегося исполнительным элементом регулятора реактивного тока. Электродвигатель MI получает питание от цепей тока TA и напряжения TV . Его вращающий момент пропорционален произведению напряжений, подводимых к его обмоткам, и синусу угла между их векторами. В рассматриваемой схеме это напряжения \underline{U}' и $\Delta U_{рег} = U_3 - U_{1р}$, где U_3 — напряжение задания (устанавливается автотрансформатором $TL2$), а $U_{1р}$ — напряжение пропорциональное реактивному току электродвигателя M . Управление момента такое, что электродвигатель MI вращается в сторону уменьшения разности $\Delta U_{рег}$ до тех пор, пока $\Delta U_{рег}$ не приблизится к нулю.

При вращении электродвигателя MI и сельсина BG изменяется коэффициент k , определяющий напряжение kU_c , и тем самым осуществляется новая уставка регулятора напряжения. Работа УАРВ поясняется на рис. 15.6, в. Исходному режиму соответствует точка A на характеристике 1 . При снижении напряжения сети РН увеличивает ток I_n и новый режим характеризуется точкой B . Если нарушение режима кратковременное, то ротор сельсина BG поворачивается на незначительный угол, т. е. PPT не успевает заметно изменить уставку регулятора напряжения и после восстановления нормального напряжения УАРВ вновь переходит в режим A . При длительном снижении напряжения ротор сельсина поворачивается на угол, соответствующий новому заданию (уставке) регулятора напряжения, т. е. происходит переход на характеристику 2 в точку $Г$. После восстановления напряжения РН переводит систему в режим, которому соответствует точка B . В этом режиме ток I_n и отдаваемый реактивный ток ниже, чем в исходном режиме A , и через некоторое время PPT возвращает систему в режим A . При толчках нагрузки на валу синхронного электродвигателя процессы в системе УАРВ происходят практически при неизменном задании РН и система стремится поддерживать напряжение сети.

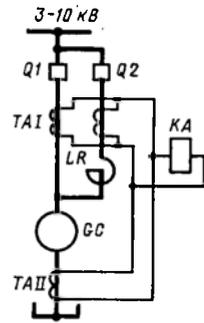
Рис. 15.7. Однолинейная принципиальная схема дифференциальной токовой защиты синхронного компенсатора

§ 15.4. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Особенности защиты. По характеру повреждений и ненормальных режимов работы синхронные компенсаторы не отличаются от синхронных генераторов, поэтому защиты синхронного компенсатора выполняются в основном аналогично защитам синхронного генератора соответствующей мощности. Пуск синхронного компенсатора GC обычно осуществляется через реактор LR , который включается в зону действия дифференциальной защиты (рис. 15.7). Контроль исправности цепей тока дифференциальной защиты не предусматривается. Защиту от замыкания на землю в цепи возбуждения выполняют так же, как для гидрогенераторов.

Некоторые особенности имеют защиты от ненормальных режимов работы. *Минимальная защита напряжения* отключает синхронный компенсатор при глубоких понижениях напряжения, для чего ее напряжение срабатывания выбирается в пределах $U_{с.з} = (0,1 \dots 0,2) U_{ном}$. Защита имеет выдержку времени $t_{с.з} \approx 10$ с и предотвращает пуск компенсатора с закороченным реактором при восстановлении напряжения. *Токовая защита от перегрузки* на подстанциях без постоянного дежурного персонала при наличии на синхронных компенсаторах устройств АРВ действует с двумя выдержками времени: с меньшей — на снижение тока возбуждения, с большей — на отключение. Этим предотвращается недопустимая перегрузка синхронного компенсатора, обусловленная действием устройства АРВ при продолжительном снижении напряжения. На подстанциях с дежурным персоналом защита от перегрузки может действовать на сигнал. При этом она должна выводиться на период пуска синхронного компенсатора, если возможно ее срабатывание в этом режиме. *Защита от сверхтоков внешних коротких замыканий* обычно не предусматривается. На синхронных компенсаторах мощностью 50 Мвар и более устанавливается *защита от потери возбуждения*, если не предусматривается возможность перевода компенсаторов на режим работы с отрицательным током ротора. При потере питания синхронный компенсатор, как и синхронный двигатель, следует либо отключить, либо снимать с него возбуждение. Это выполняет *защита от потери питания*.

Особенности устройства АРВ. Основная особенность устройств АРВ синхронных компенсаторов связана с тем, что синхронный компенсатор может работать как в режиме генерации, так и в



режиме потребления реактивной мощности. В связи с этим устройство АРВ должно изменять ток возбуждения в широких пределах, включая изменение его полярности. Требуемый диапазон имеет устройство АРВ со знакопеременным током $I_{\text{рег}}$ (положительным — в режиме генерации реактивной мощности, отрицательным — в режиме ее потребления) [77]. Его измерительный орган содержит три канала: измерения напряжения синхронного компенсатора $U_{\text{с.к}}$, измерения тока $I_{\text{с.к}}$ и измерения угла δ между векторами ЭДС статора и напряжения сети. Суммарное напряжение всех каналов U_y после усиления управляет работой быстродействующего реверсивного тиристорного исполнительного усилителя, питающего обмотку возбуждения возбудителя. В зависимости от режима работы синхронного компенсатора изменяются составляющие суммарного напряжения U_y управления. Это приводит к изменениям значения и знака напряжения управления и соответствующим изменениям значения и направления тока регулятора.

§ 15.5. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ

Асинхронные электродвигатели напряжением до 1 кВ находят массовое применение в различных отраслях народного хозяйства. Они имеют относительно небольшую мощность и невысокую стоимость. Защита и автоматика таких электродвигателей должны отличаться простотой устройства и обслуживания, малой трудоемкостью ремонта, экономичностью и надежностью. Этим требованиям удовлетворяют устройства защиты и автоматики, выполненные наиболее простыми средствами: плавкими предохранителями, расцепителями автоматических выключателей и тепловыми реле магнитных пускателей. Если коммутационным аппаратом служит контактор, то устройства защиты и автоматики выполняют на оперативном переменном токе, используя первичные и вторичные реле косвенного действия.

Защита от коротких замыканий. В сетях с глухозаземленными нейтралью защита электродвигателя от коротких замыканий выполняется трехфазной. Этим обеспечивается ее действие не только при многофазных повреждениях, но и при однофазных коротких замыканиях. В сетях с изолированными нейтралью трехфазной выполняется только защита предохранителями. При использовании других аппаратов можно ограничиваться включением их в две фазы.

Защита плавкими предохранителями выполняется, как правило, отдельно для каждого электродвигателя. Выбор предохранителей и их плавких вставок осуществляется по условиям (11.1) и (11.2). При этом в качестве максимального рабочего тока $I_{\text{раб max}}$ берется номинальный ток электродвигателя

$I_{д.ном}$, а ток кратковременной перегрузки $I_{пер}$ принимается равным пусковому току $I_{пск}$ электродвигателя. В отдельных случаях допускается использовать один комплект предохранителей для защиты нескольких электродвигателей малой мощности, работающих поочередно. В этом случае предохранители выбираются по току электродвигателя наибольшей мощности. Чувствительность предохранителей должна удовлетворять требованиям, изложенным в § 11.3.

Защита расцепителями автоматических выключателей более совершенна, чем защита предохранителями.

Расцепители позволяют выполнить все виды защиты — от коротких замыканий, перегрузки, снижения напряжений. Защитой от коротких замыканий является токовзятая отсечка, для выполнения которой используют в зависимости от типа автоматического выключателя электромагнитные или полупроводниковые расцепители. Ток срабатывания токовой отсечки выбирают, как и для электродвигателей напряжением выше 1 кВ, по условию (15.1). При этом коэффициент отстройки для электромагнитного расцепителя принимают $k^1_{отс} \approx 2$, для полупроводниковых расцепителей $k^1_{отс} \approx 1,5$. При коротких замыканиях на выводах электродвигателя отсечка должна иметь необходимую чувствительность. Допускается $k_{\gamma} \geq 1,4 \dots 1,5$. Если чувствительность к однофазным к.з. оказывается недостаточной, то рекомендуется предусматривать специальную защиту с помощью выносных реле.

Защита максимальными реле тока выполняется в виде токовой отсечки. Для этого обычно используют электромагнитные первичные реле косвенного действия РЭВ-200, РЭВ-570 и др., рассчитанные на различные номинальные токи.

На рис. 15.8, а показана схема токовой отсечки без выдержки времени в трехфазном исполнении. Реле тока $КА1—КА3$ включаются в каждую фазу статора непосредственно. При срабатывании хотя бы одного реле размыкается соответствующий контакт $КА1—КА3$ в цепи катушки контактора $КМ$ и электродвигатель отключается от сети.

Для защиты можно использовать и вторичные реле косвенного действия, включаемые через трансформаторы тока. При выборе

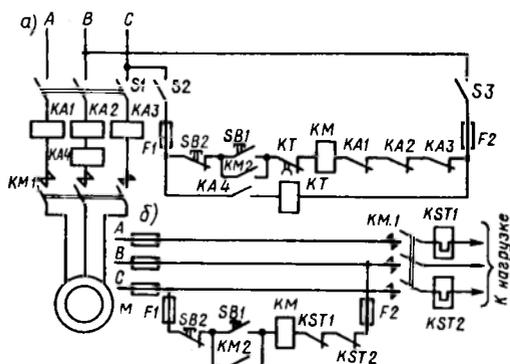


Рис. 15.8. Защита электродвигателя от коротких замыканий и перегрузок

тока срабатывания коэффициент отстройки можно принять $k_{\text{отс}} = 1,3 \dots 1,5$.

Чувствительность отсечки считается достаточной, если при коротких замыканиях на выводах электродвигателя коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} \geq 2,0$.

Защита от перегрузки. При перегрузках появляется сверхток и повышается температура обмотки электродвигателя, поэтому от перегрузки используют либо токовую защиту, реагирующую на возрастание тока, либо температурную защиту. Токковая защита выполняется электромеханическими, полупроводниковыми или электротепловыми реле. Защита от перегрузки не должна срабатывать при кратковременных перегрузках, поэтому она имеет выдержку времени и действует на отключение, на сигнал или разгрузку механизма. Защита устанавливается в тех случаях, когда возможна технологическая перегрузка механизма, а также когда требуется ограничить длительность пуска или самозапуск при пониженном напряжении [3].

Защита от перегрузки, выполняемая посредством электромагнитных реле, содержит реле тока, включаемое непосредственно в фазу двигателя или во вторичную цепь трансформатора тока, и реле времени (реле КА4 и КТ на рис. 15.8, а). Если защита от перегрузки должна отключать электродвигатель и при обрыве фазы, то ее выполняют двухфазной. Двухфазное выполнение является обязательным при защите электродвигателя от к. з. предохранителями. В защите применяют такие же реле, какие используются для защиты электродвигателей от коротких замыканий. Включая реле через трансформатор тока, защиту можно сделать более чувствительной, используя в ней реле с более высоким коэффициентом возврата, чем у первичных реле.

Ток срабатывания реле должен удовлетворять условиям (15.5) и (15.6), а выдержка времени реле КТ принимается больше времени нормального пуска (не менее $t_{\text{с.з}} = 3$ с). При длительной перегрузке и при затянувшемся пуске электродвигателя реле времени успевает сработать и, размыкая контакт КТ в цепи КМ катушки контактора, отключает электродвигатель.

Защита от перегрузки полупроводниковыми расцепителями автоматических выключателей. Они используются при подключении электродвигателя к сети через автоматический выключатель. Для определения тока срабатывания используют выражения (15.5) и (15.6). При этом защита считается эффективной, если

$$I_{\text{с.з}}^{\text{III}} \ll (1,2 \dots 1,4) I_{\text{л.ном.}} \quad (15.7)$$

Это условие не выполняется расцепителем автоматического выключателя «Электрон» из-за сравнительно низкого коэффициента

возврата $k_b=0,75$ и значительного коэффициента отстройки $k^{III}_{отс}=1,3\dots1,5$. Полупроводниковые расцепители автоматических выключателей «Электрон», А3700, ВА имеют регулируемую выдержку времени в пределах 4—16 с при кратности тока, равном $6I_{рц.ном}$. Это позволяет обеспечить недействие защиты в нормальном пусковом режиме.

Защита от перегрузки, выполненная посредством тепловых расцепителей и электротепловых реле. Если электродвигатель подключается в сеть через автоматический выключатель с тепловым или комбинированным расцепителем, то тепловой расцепитель используют для выполнения защиты от перегрузки. При этом наилучшая защита обеспечивается, если удастся выбрать номинальный ток расцепителя $I_{рц.ном}$ равным номинальному току электродвигателя $I_{д.ном}$. Для тепловых расцепителей $k_b=1$, поэтому из выражения (15.5) имеем $I_{с.з}^{III} = k^{III}_{отс} I_{д.ном} = k^{III}_{отс} I_{рц.ном}$. Отношение $I_{с.з}^{III}/I_{рц.ном} = k^{III}_{отс}$ определяется типом автоматического выключателя и устанавливается при калибровке расцепителя. Для выключателя А3700 $k^{III}_{отс} = 1,15$, для А3100 $k^{III}_{отс} = 1,25$ и для ВА $k^{III}_{отс} = 1,2\dots1,35$ в зависимости от типа выключателя. В ряде случаев из-за невозможности установить требуемый ток срабатывания токовой отсечки комбинированного расцепителя приходится завышать его номинальный ток. При этом не обеспечивается условие (15.7), т. е. защита от перегрузки становится малоэффективной. Это характерно прежде всего для расцепителей выключателя А3100. Выдержка времени тепловых расцепителей в условиях эксплуатации не регулируется и составляет 8—20 с в зависимости от значения $I_{рц.ном}$. Такая выдержка времени позволяет отстроить защиту от нормальных пусков и самозапусков электродвигателя. Если электродвигатель подключается к сети через магнитный пускатель, то для защиты от перегрузки используют тепловые реле, встроенные в магнитный пускатель.

Как и в тепловом расцепителе автоматического выключателя, основным элементом электротеплового реле является биметаллическая пластина. В защищаемую цепь (фазу статора) электротепловое реле включается непосредственно или через трансформатор тока (для крупных электродвигателей).

Чтобы использовать электротепловые реле для защиты электродвигателя от работы на двух фазах, магнитный пускатель содержит два электротепловых реле ($KST1$ и $KST2$ на рис. 15.8, б). В отличие от рассматриваемых ниже специальных схем после обрыва фазы электротепловые реле отключают электродвигатель не мгновенно, а через некоторое время. С помощью тепловых реле наиболее удовлетворительно защищаются от перегрузки электродвигателя длительного режима работы.

Номинальный ток электротеплового реле $I_{р.ном}$ и номинальный ток его сменного нагревателя $I_{нг.ном}$ выбирают, исходя из номи-

нального тока электродвигателя:

$$I_{p, \text{ном}} \geq I_{\text{нг. ном}} \approx I_{\text{д. ном}} / K_I. \quad (15.8)$$

Для настраиваемых реле одной из характеристик является номинальный ток уставки $I_{y, \text{ном}}$. Это наибольший длительный ток, который при данной настройке реле не вызывает его срабатывания. Для таких реле должно соблюдаться условие

$$I_{y, \text{ном}} \geq I_{\text{нг. ном}} \approx I_{\text{д. ном}} / K_I.$$

При коротком замыкании нагреватель реле может перегореть раньше, чем реле отключит электродвигатель, поэтому в большинстве случаев защита с электротепловыми реле устанавливается только при наличии быстродействующей защиты от коротких замыканий, например плавких предохранителей. Необходимо отметить, что защитные характеристики тепловых расцепителей автоматических выключателей и электротепловых реле плохо согласуются с тепловой перегрузочной характеристикой электродвигателя. Они не позволяют полностью использовать его перегрузочную способность. Существенным недостатком этих реле является недостаточная стабильность параметров срабатывания в процессе эксплуатации, связанная с изменением структуры материала биметаллического элемента в результате многократного воздействия токов перегрузки и токов к.з. В [145] показано, что после годичной эксплуатации время срабатывания тепловых расцепителей автоматических выключателей АЗ100 возросло в несколько раз. Необходимо также указать на зависимость защитных характеристик реле от окружающей температуры.

Температурная защита [137, 146] использует измерительные преобразователи (датчики) нагрева обмоток электродвигателя: температурные реле и терморезисторы, встраиваемые в лобовые части обмотки статора или вблизи от нее. Одна из конструкций встраиваемого температурного реле рассмотрена выше (см. § 4.2). Биметаллический элемент реле нагревается теплотой обмотки статора и при определенной температуре размыкает контакты, отключая контактор. Реле непосредственно контролирует температуру обмоток статора. Этим достигается более строгое согласование защитной характеристики с тепловой перегрузочной характеристикой электродвигателя. Имеются многочисленные предложения по использованию терморезисторов для выполнения температурной защиты электродвигателей напряжением до 1 кВ (см., например, [136, 145, 147]). Схема одной из таких защит типа УВТЗ-2 для электродвигателей, используемых в сельскохозяйственном производстве, показана на рис. 15.9 [137].

Исполнительным элементом устройства является реле постоянного тока KL , в цепь обмотки которого включены последовательно соединенные между собой позисторы RK , встроены в обмотки фаз электродвигателя. Питание реле осуществляется через стабилизированный выпрямитель, состоящий из диода $VD1$,

резистора $R1$, стабилитрона $VD2$ и конденсатора $C1$. При допустимых температурах обмоток сопротивление позисторов не превышает $R=150 \dots 450$ Ом и реле KL находится в состоянии после срабатывания, замыкая своим контактом цепь катушки KM контактора. В аварийных режимах, когда температура обмотки электродвигателя достигает установленного значения, сопротивление позисторов резко возрастает, ток в обмотке реле уменьшается и оно возвращается в исходное состояние, размыкая цепь катушки контактора. Электродвигатель отключается.

В системах электроснабжения напряжением до 1 кВ обрыв нулевого провода недопустим, так как при этом нарушается связь между корпусом электрооборудования и заземленной нейтралью.

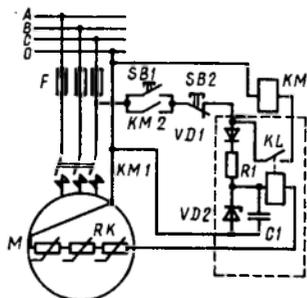


Рис. 15.9. Температурная защита электродвигателя

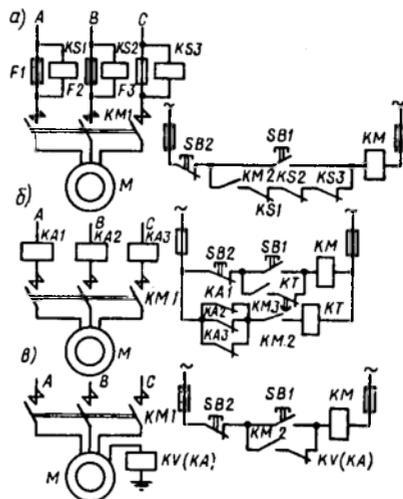


Рис. 15.10. Защита от обрыва фазы

рально электроустановки и это может привести к поражению людей электрическим током. Устройство УВТЗ-2 является защитой и от обрыва нулевого провода. При обрыве напряжение на обмотке реле KL исчезает и электродвигатель отключается.

Несмотря на многообразие схем и принципов выполнения защиты от перегрузки, требуется дальнейшая работа по ее усовершенствованию. Необходимо более полное согласование характеристики защиты с тепловой перегрузочной характеристикой двигателя. Наиболее перспективна в этом отношении, очевидно, температурная защита [145, 148], при наличии которой необходимость в других устройствах защиты от ненормальных режимов работы электродвигателя отпадает. Действительно, ненормальные режимы (перегрузка, снижение напряжения, обрыв фазного провода) сопровождаются увеличением в той или иной степени тока электродвигателя и соответствующим нагревом его обмоток. Поэтому температурная защита, контролирующая температуру обмоток, принципиально обеспечивает защиту электродвигателя при возникновении любого ненормального режима, т. е. является универсальной защитой. Защитная характеристика температурной защиты в большей степени, чем у других защит, соответствует перегрузочной характеристике электродвигателя.

Защита от обрыва фазы. Если для электродвигателя, защищаемого предохранителями (или подключенного к сети с такой защитой), возникает необходимость в защите от обрыва фазы, то она может выполняться по одной из схем рис. 15.10 [146]. В первой схеме (рис. 15.10, а) при перегорании одного из предохранителей $F1—F3$ на обмотке соответствующего реле контроля обрыва фазы $KS1—KS3$ возникает напряжение, реле своим размыкающим контактом $KS1—KS3$ разрывает цепь самоудерживания контактора KM и электродвигатель отключается. Во второй схеме (рис. 15.10, б) применены реле тока $KA1—KA3$, обмотки которых выбираются по номинальному току электродвигателя, а токи отпускания — меньше тока холостого хода электродвигателя. При нормальном пуске реле времени KT не успевает срабатывать и его контакт не размыкает цепь самоудерживания контактора KM . После исчезновения тока в одной из фаз реле KT отключает электродвигатель. В третьей схеме (рис. 15.10, в) использовано одно реле $KV (KA)$, реагирующее на смещение нейтральной обмотки статора при обрыве фазы. При этом может использоваться или реле напряжения KV , имеющее уставку $U_{с.р} \approx 0,3U_{ном}/K_U$, или реле тока KA с уставкой $I_{с.р} < 0,3I_{д.ном}/K_I$. По такой схеме можно включить и обмотку максимального расцепителя (если электродвигатель подключается к сети через автоматический выключатель).

Отметим, что в эксплуатации находятся и другие схемы защиты от обрыва фазы. Например, в [134] предложено катушку контактора KM подключать к трем фазам через трехфазный выпрямитель. При обрыве одной из фаз выпрямленное напряжение снижается и контактор отключается. Имеются различные схемы комбинированных защит на полупроводниковой элементной базе, в которых защита от обрыва фазы совмещается с защитой от перегрузки (см., например, [135]) или с защитой от коротких замыканий и перегрузки [149]. В [131] рассматривается устройство защиты от несимметричных к.з. и обрыва фазы, реагирующее на изменение фазовых сдвигов между токами статора. При наличии температурной защиты специальная защита от обрыва фазы требует обоснования.

Минимальная защита напряжения и автоматика асинхронных электродвигателей. Минимальная защита напряжения может быть осуществлена, если электродвигатель включается в сеть через автоматический выключатель, контактор или магнитный пускатель. При этом в ряде случаев дополнительное реле не требуется, так как схема управления аппаратом уже содержит элементы минимальной защиты напряжения. Такой, например, является схема управления магнитным пускателем (см. рис. 15.8), так как исчезновение или снижение напряжения на катушке KM магнитного пускателя приводит к его отключению. При восстановлении напряжения пускатель автоматически включиться не мо-

жет. Для этого нужно нажать на кнопочный выключатель *SB1*.

Если в цепях управления используется ключ *SA* с фиксированными положениями (рис. 15.11, а) или цепи управления подключаются к независимому источнику питания (рис. 15.11, б), то для минимальной защиты применяется реле напряжения *KV*, которое может размыкать цепь удерживающей катушки *KM* контактора при напряжении $U = (0,25 \dots 0,7) U_{\text{ном}}$ (в зависимости

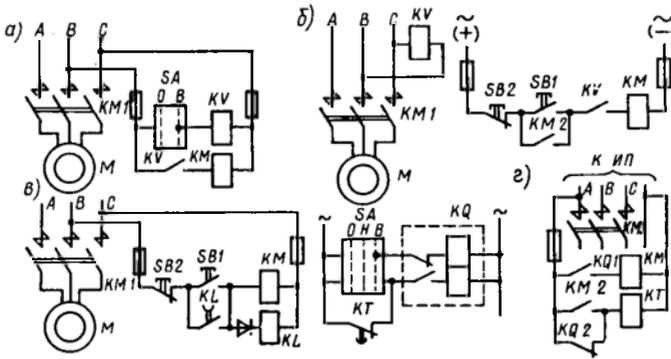


Рис. 15.11. Минимальная защита напряжения электродвигателей напряжением до 1 кВ

от типа реле и его уставки), причем в схеме рис. 15.11, а контактор после восстановления напряжения автоматически включается, производя *автоматическое повторное включение электродвигателя*.

Для ответственных электродвигателей схемы управления, защиты и автоматики обычно выполняются так, что повторное включение контактора или пускателя обеспечивается лишь при восстановлении напряжения в течение заданного времени. В схеме, показанной на рис. 15.11, в, выдержку времени создает реле *KL*, имеющее замедление на возврат. Недостаток этой схемы состоит в том, что при оперативном отключении электродвигатель отключается не сразу после нажатия на кнопочный выключатель *SB2*; длительность нажатия должна быть больше выдержки времени, создаваемой реле *KL*.

Одна из схем, не имеющих указанного недостатка, приведена на рис. 15.11, г. В схеме применены двухпозиционное реле фиксации команды *KQ*, получающее питание от независимого источника переменного оперативного тока, и реле времени *KT*, начинающее отсчет времени при снятии напряжения с его обмотки (реле ЭВ-235). Обмотка реле *KT* питается от силовой сети. При подаче команды на включение реле *KQ* переключается и включает контактор *KM*. Вспомогательный контакт *KM2* контактора подает питание на обмотку реле *KT*. При исчезновении напряжения в

силовой сети контактор KM отключается, а реле KT начинает отсчет времени. Если восстановление напряжения происходит раньше замыкания контакта реле KT , то через контакты непереключившегося реле KQ на обмотку KM контактора подается напряжение и электродвигатель включается. Если перерыв питания длительный, то контакт реле KT замыкается и переключает реле KQ в положение, не допускающее повторного пуска электродвигателя при последующем восстановлении напряжения.

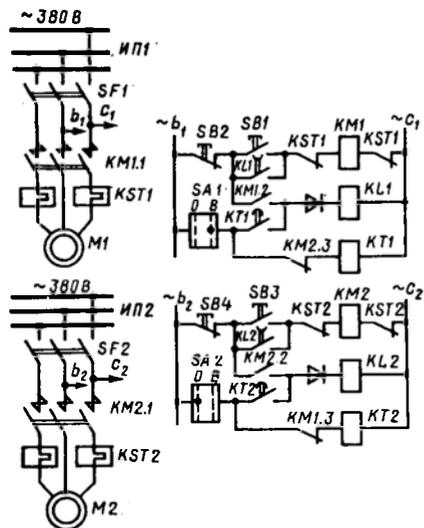


Рис. 15.12. Комбинированная схема устройства АПВ—АВР электродвигателей напряжением до 1 кВ

Некоторые из рассмотренных схем минимальной защиты напряжения одновременно выполняют функции устройств АПВ, так как допускают повторное включение электродвигателей при восстановлении напряжения, поэтому такие схемы часто называют схемами АПВ электродвигателей. Схему, показанную на рис. 15.11, а, можно назвать схемой АПВ постоянного действия, а схемы, приведенные на рис. 15.11, в, г,—схемами АПВ с действием в течение заданного времени.

Устройство АПВ постоянного действия включает электродвигатель и при подключении его к сети через контактор с защелкой, однако функций минимальной защиты напряжения такой контактор не выполняет. Приведенные схемы не исчерпывают всего многообразия устройств АПВ, применяемых на промышленных предприятиях. Многие из этих устройств выполнены на полупроводниках.

Если по условиям технологического процесса требуется автоматическое включение резервного электродвигателя, то схему АВР выполняют также на контакторах или магнитных пускателях.

Если по условиям технологического процесса требуется автоматическое включение резервного электродвигателя, то схему АВР выполняют также на контакторах или магнитных пускателях.

Для примера на рис. 15.12 показана комбинированная схема АПВ—АВР электродвигателей низкого напряжения. Взаимно резервируемые электродвигатели $M1$ и $M2$ присоединены к разным источникам питания $ИП1$ и $ИП2$ через магнитные пускатели $KM1$ и $KM2$, схемы управления которыми подключены, например, к фазам B и C источников питания (b_1, c_1 и b_2, c_2). Для выбора рабочего и резервного электродвигателей служит ключ SA .

Если, например, электродвигатель $M1$ является рабочим (контакт $SA1$ разомкнут, а $SA2$ замкнут), а $M2$ — резервным, то после исчезновения напряжения источника питания $ИП1$ магнитный пускатель $KM1$ отключает электродви-

гатель $M1$. При этом одновременно начинают отсчет времени реле $KL1$ с задержкой на отпущание якоря (реле, разрешающее АПВ) и реле $KT2$ (реле, осуществляющее АВР). Выдержка времени реле $KL1$ составляет $t_1=1,3$ с, а реле $KT2$ — около $t_2=2$ с. В зависимости от того, на какое время нарушилось электроснабжение (менее 1,3 с или более), происходит АПВ электродвигателя $M1$ или АВР электродвигателя $M2$. При АВР схема действует в следующем порядке: замыкается контакт $KT2$, срабатывает реле $KL2$, контактом $KL2$ подается питание на катушку магнитного пускателя $KM2$ и он включает резервный электродвигатель $M2$.

Если электродвигатель $M1$ отключается защитой (автоматическим выключателем $SF1$ или электротепловыми реле $KST1$), то происходит только АВР электродвигателя $M2$.

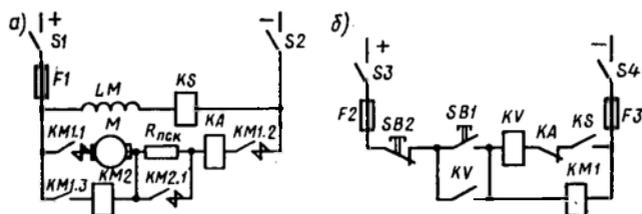


Рис. 15.13. Схема управления и защиты электродвигателя постоянного тока

Управление и защита электродвигателей постоянного тока. Защита электродвигателей постоянного тока от коротких замыканий, перегрузок и понижений напряжения осуществляется аналогично соответствующим защитам асинхронных электродвигателей. Схема управления и защиты электродвигателя постоянного тока средней мощности с независимым возбуждением приведена на рис. 15.13, а, б.

В этой схеме контактор $KM1$ служит для подключения цепи якоря к источнику питания в момент пуска, а контактор $KM2$ — для закорачивания пускового реостата $R_{пск}$. После того как электродвигатель наберет обороты, его пусковой ток уменьшится, а создаваемая якорем противо-ЭДС станет достаточной для срабатывания контактора $KM2$. Так как коэффициент возврата контакторов постоянного тока очень низок ($k_v=0,1 \dots 0,15$), то контактор $KM1$ для минимальной защиты напряжения непосредственно использовать нельзя, поэтому защита выполнена с помощью реле напряжения KV . Вспомогательный контакт контактора $KM1.3$ (в цепи катушки $KM2$) защищает электродвигатель от запуска с закороченным пусковым реостатом в тех случаях, когда запуск осуществляется вскоре после его отключения. Отсутствие этого контакта привело бы к длительному удерживанию контактора $KM2$ из-за противо-ЭДС якоря, вращающегося по инерции после отключения питания.

Цепь якоря и цепи управления защищены от коротких замыканий плавкими предохранителями $F1-F3$, а от перегрузок якорь защищает реле тока KA . При обрыве цепи обмотки возбуждения LM срабатывает реле обрыва поля KS и электродвигатель отключается,

§ 15.6. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1 кВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

Известно, что прогрессивная тенденция бесконтактного выполнения схем автоматизации проявилась и в разработке новых устройств управления низковольтными электродвигателями, их защиты и автоматики. Для электродвигателей, работающих с частым пуском, магнитные пускатели оказываются мало пригодными из-за быстрого механического износа. Освоение промышленного выпуска тиристоров большой мощности позволяет разработать на их основе тиристорные выключатели — бесконтактные аналоги магнитных пускателей. Однако перегрузочная способность тиристорных аппаратов управления гораздо ниже перегрузочной способности проводов, кабелей и электродвигателей. Это понуждает принимать специальные меры по ограничению воздействия тока короткого замыкания на силовые полупроводниковые приборы. Эти меры сводятся к следующим:

а) применение токоограничивающих реакторов и согласующих трансформаторов с повышенным напряжением короткого замыкания;

б) завышение номинального тока тиристоров;

в) применение быстродействующих средств защиты.

Применение токоограничивающих реакторов и согласующих трансформаторов сопровождается увеличением потерь электроэнергии, снижением коэффициента мощности, значительным увеличением массы и габаритов аппаратов управления, излишним расходом цветного металла. Завышение номинальных токов тиристоров связано также с излишним расходом материалов, в том числе полудрагоценных и драгоценных, увеличением массы и габаритов аппаратов управления. Таким образом, как в том, так и в другом случае в конечном счете снижается надежность и ухудшаются экономические показатели системы электроснабжения. Быстродействующие защиты позволяют избежать установки реакторов, согласующих трансформаторов и завышения номинального тока тиристоров. Это обеспечивает только защита по управляющему электроду в сочетании с емкостным прерывателем тока, однако она требует значительного усложнения силовой схемы аппарата и логической части защиты, применения прерывающих конденсаторов значительной емкости. Из-за этого она практически не применяется.

Один из эффективных и экономичных способов ограничения токов короткого замыкания состоит в использовании жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей (ЖСП). Их применение в сочетании с защитой по управляющему электроду позволяет отказаться от токоограничивающих реакторов, согласующих трансформаторов, прерывающих конденсаторов и завы-

нения номинального тока тиристоров аппарата управления [150, 151]. При этом целесообразно использовать ЖСП не только как токоограничивающее устройство, но и вместо трансформаторов тока. При превышении током заданного значения ЖСП срабатывает, ограничивая ток до уровня, допустимого для тиристоров, на его выводах появляется дискретный сигнал — напряжение, которое используется в логической части схемы защиты для снятия управляющих сигналов с силовых тиристоров.

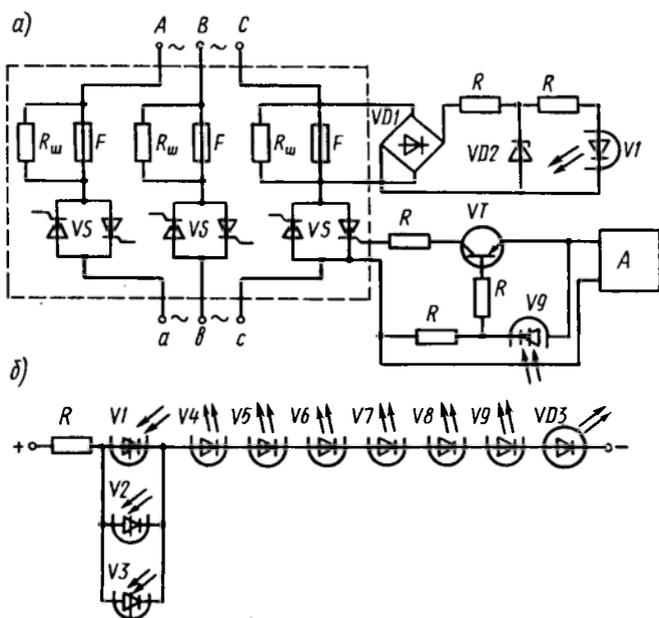


Рис. 15.14. Принципиальная схема устройства защиты на основе ЖСП

На этой основе разработан и изготовлен тиристорный пускатель с устройством защиты по управляющему электроду на номинальный ток, равный 60 А [152, 153]. В аппарате использован ЖСП, конструкция которого показана на рис. 4.12 (см. § 4.4). Принципиальная схема устройства с блоком защиты для одной фазы изображена на рис. 15.14, а, б.

Блок защиты содержит выпрямитель $VD1$, подключенный к ЖСП с шунтирующим резистором R_w , и измерительный орган, состоящий из ограничительных резисторов R и светодиода оптронной пары VI . Стабилитрон $VD2$ служит для ограничения напряжения на светодиоде. Тиристор оптронной пары VI включен в цепь постоянного тока последовательно со светодиодами оптронных пар $V4—V9$ и сигнальным светодиодом $VD3$. Параллельно тиристор оптронной пары VI подключены тиристоры оптронных пар $V2$ и $V3$, светодиоды которых являются элементами измерительных органов защиты двух других фаз. Тири-

сторы оптронных пар $V4—V9$ включены в цепь база — коллектор транзисторов VT , которые обеспечивают прохождение сигналов управления в цепи каждого из управляющих электродов силовых тиристоров при закрытом тиристоре оптронной пары $V4—V9$. Транзисторы VT в данном случае открыты отрицательным напряжением смещения база — эмиттер. Тиристорный пускатель находится во включенном положении. При срабатывании ЖСП напряжение на входе защиты возрастает, тиристор оптронной пары $V1$ открывается, обеспечивая прохождение тока через светодиоды оптронных пар $V4—V9$ и сигнальный светодиод $VD3$. Тиристоры оптронных пар $V4—V9$ открываются, вызывая переход в закрытое состояние транзисторов VT , при этом прекращается прохождение сигналов управления в цепи каждого из управляющих электродов силовых тиристоров. После прохождения тока в силовой цепи через нулевое значение тиристорный пускатель отключается, но тиристоры оптронных пар $V1, V2, V3$ остаются открытыми, препятствуя повторному включению пускателя, поэтому схеме управления необходимо вернуть в исходное состояние путем снятия оперативного тока на время, необходимое для закрытия тиристоров оптронных пар $V1, V2, V3$. Это можно обеспечить действием дежурного персонала или средствами автоматики перед операцией включения.

Аппарат испытан в Ульяновском отделении ВНИИ Электроаппарат. В цепи с током короткого замыкания 50 кА и напряжением 250 В предохранитель ограничивает ток до значения 1—1,5 кА. Для надежного действия защиты с использованием ЖСП необходимо правильно определить напряжение срабатывания и обеспечить требуемую чувствительность.

Защита не должна срабатывать в нормальном режиме, когда на резисторе R_F ЖСП максимальный рабочий ток $I_{раб\ max}$ создает падение напряжения равное $\sqrt{2} I_{раб\ max} R_F$. Защита будет отстроена от этого режима, если принять

$$U_{с.з} = k_{отс} \sqrt{2} I_{раб\ max} R_F, \quad (15.9)$$

где $k_{отс} = 1,5 \dots 2$.

При этом защита должна обладать требуемой чувствительностью при перегрузке и при к.з. Минимально возможное значение тока перегрузки, при котором возможно срабатывание ЖСП, равно его пограничному току:

$$I_n = k_n I_{вс.ном},$$

где $k_n = 1,1$.

В этом случае входная воздействующая величина, представляющая собой амплитудное значение падения напряжения на резисторе $R_{ш}$, будет минимальной:

$$U_{m\ in\ n} = \sqrt{2} k_n I_{вс.ном} R_{ш},$$

а коэффициент чувствительности

$$k_q = U_{m\ in\ n} / U_{с.з} = k_n I_{вс.ном} R_{ш} / (k_{отс} I_{раб\ max} R_F) \quad (15.10)$$

При коротких замыканиях за минимально возможное значение входной воздействующей величины следует принять ее значение в момент времени, когда до конца полупериода остается время $t_{доп}$ равное 1—1,5 мс:

$$U_{m\ in\ n} = U_m \sin \omega t_{доп} = (\sqrt{2} U_{ном} R_{ш} / \sqrt{(\omega L)^2 + (R_c + R_{ш})^2}) \sin \omega t_{доп},$$

где R_c — активное сопротивление цепи к.з.

При этом коэффициент чувствительности

$$k_q = \frac{U_{ном} R_{ш} \sin \omega t_{доп}}{k_{отс} I_{раб\ max} R_F \sqrt{(\omega L)^2 + (R_c + R_{ш})^2}}. \quad (15.11)$$

Если чувствительность защиты при перегрузках и коротких замыканиях или в одном из этих режимов оказывается недостаточной ($k_q < 1,5$), следует увеличить значение сопротивления $R_{ш}$. Экспериментальным путем определено значение сопротивления R_F . В расчетах R_F можно принять равным 2,2—2,6 мОм.

§ 15.7. ВЛИЯНИЕ СИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

При наличии синхронных электродвигателей появляются дополнительные требования к устройствам релейной защиты и автоматики элементов системы электроснабжения [154]. Рассмотрим их.

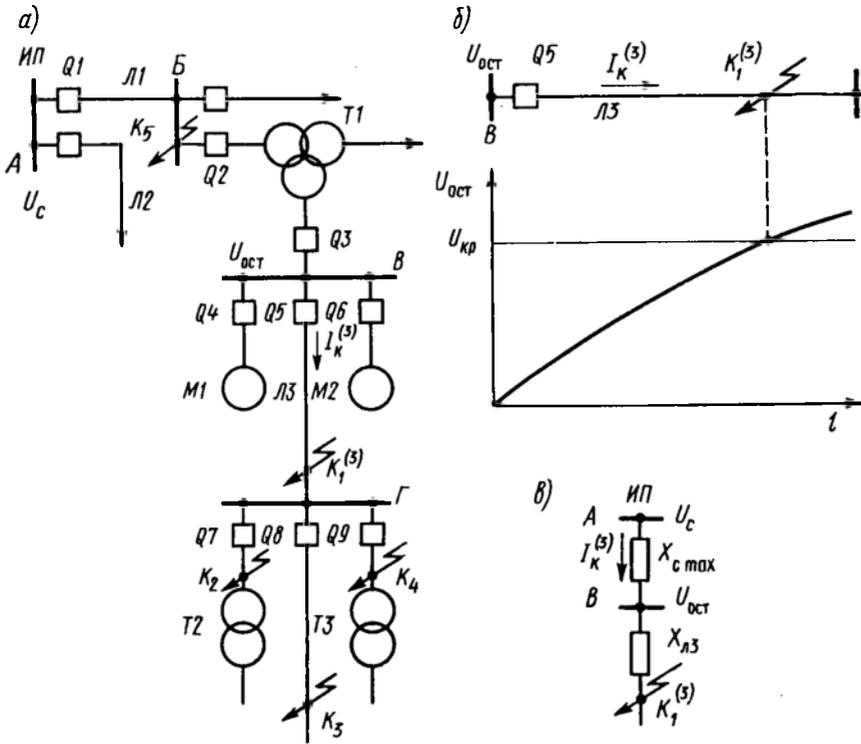


Рис. 15.15. Схема электроснабжения (а) и выбор тока срабатывания токовой отсечки линии Л3 с учетом обеспечения устойчивой работы синхронных электродвигателей (б, в)

1. Все короткие замыкания в системе электроснабжения, сопровождающиеся опасными для устойчивости синхронных электродвигателей понижениями напряжения, должны отключаться быстродействующими защитами. Для линии Л3, например, такой защитой обычно является токовая отсечка без выдержки времени (рис. 15.15, а). Выбор ее тока срабатывания обоснован в

§ 5.3. Однако для предотвращения асинхронного режима синхронных электродвигателей $M1, M2$ при к.з. на этой линии необходимо ток срабатывания отсечки $I_{с.з}^1$ выбрать так, чтобы она отключала линию, если остаточное напряжение на шинах подстанции $B U_{ост}$ снижается до значения $U_{кр}$, опасного для устойчивой работы электродвигателя. Расчетным является трехфазное короткое замыкание на линии и минимальном режиме работы системы электрообеспечения. При этом остаточное напряжение $U_{ост}$ снижается по мере приближения точки к.з. к шинам и при повреждении в точке $K_1^{(3)}$ достигает значения $U_{кр}$ при токе, равном $I_{к^{(3)}}$ (рис. 15.15, б). Поэтому все к.з. между шинами подстанции B и точкой $K_1^{(3)}$ должны отключаться токовой отсечкой. Это обеспечивается, если $I_{с.з}^1 \leq I_{к^{(3)}}$. Их схемы замещения (рис. 15.15, в) имеем $I_{к^{(3)}} = (U_c - U_{кр}) / (\sqrt{3} X_{с\max})$. Таким образом, для предотвращения асинхронного режима синхронного электродвигателя при к.з. на линии $L3$ ток срабатывания ее токовой отсечки должен удовлетворять условию

$$I_{с.з}^1 \leq (U_c - U_{кр}) / (k_{отс}^1 \sqrt{3} X_{с\max}), \quad (15.12)$$

где $k_{отс}^1 = 1,1$, а напряжение $U_{кр}$ для приближенных расчетов принимают равным $0,5U_{д.ном}$.

При этом ток $I_{с.р}^1$ может оказаться меньше тока, полученного по выражению (5.2) и токовая отсечка становится неселективной, т. е. отключает линию $L3$ и при внешних к.з. (повреждение в точках K_2, K_3, K_4). Для исправления неселективного действия токовой отсечки на линии $L3$ необходимо предусмотреть устройство АПВ. Действие его будет успешным, если внешние к.з. будут отключаться быстродействующими защитами поврежденных элементов (трансформаторов $T2, T3$ и линии $L4$) несколько раньше или по крайней мере одновременно с действием неселективной отсечки линии $L3$. В связи с этим не рекомендуется выполнять неселективную отсечку с помощью реле РТМ из-за его быстродействия. Для этой цели можно использовать реле РТ-40, а для создания некоторого замедления в схему отсечки вводится выходное промежуточное реле. Неселективная отсечка линии $L3$ не должна срабатывать при к.з. за трансформаторами $T2$ и $T3$, а также при повторном включении линии, когда по ней проходит ток, обусловленный бросками тока намагничивания всех трансформаторов, получающих питание по этой линии. В нашем случае это трансформаторы $T2$ и $T3$.

Рассмотренная токовая отсечка косвенным образом контролирует остаточное напряжение на шинах при к.з. на защищаемой линии. Этот контроль можно осуществить непосредственно, используя вместо токовой отсечки отсечку по напряжению. Ее напряжение срабатывания должно удовлетворять условию $U_{с.з}^1 \geq k_{отс}^1 U_{кр}$, где $k_{отс}^1 = 1,1$. Такая отсечка является, по существу, минимальной защитой напряжения без выдержки времени. Она,

как известно, не может определить поврежденный элемент и поэтому не может быть использована самостоятельно для указанных целей. Ее применяют как пусковой орган в схеме максимальной токовой защиты линии. При этом она может быть общей для максимальных токовых защит всех линий, отходящих от шин, напряжение которых контролируется. Параметры максимальной токовой защиты выбираются как обычно (см. § 5.5), однако схема выполняется так, что

при срабатывании отсечки по напряжению максимальная токовая защита поврежденной линии действует без выдержки времени. Одна из возможных схем оперативных цепей постоянного тока максимальной токовой защиты в однофазном исполнении показана на рис. 15.16.

Требования к защитам других элементов системы электроснабжения такие же, как и к защите линий 6 и 10 кВ. Они должны отключать эти элементы без выдержки времени при к. з., которые могут вызвать асинхронный режим синхронных электродвигателей. Необходимо отметить, что асинхронный режим нежелателен не только потому, что представляет опасность для самого электродвигателя, но и потому, что может быть причиной неселективного действия защит неповрежденных элементов системы электроснабжения. Так, если отсутствует действующая защита, например на линии ЛЗ (см. рис. 15.15, а), то при ее повреждении устойчивость синхронных электродвигателей М1 и М2 нарушается. Из-за этого ток I_k в поврежденной линии, определяемый током от системы $I_{к.с}$ и током от синхронных электродвигателей $I_{к.д}$ периодически изменяется, достигая максимального $I_{к\max}$ и минимального $I_{к\min}$ значения (рис. 15.17). В первом случае токи $I_{к.с}$ и $I_{к.д}$ арифметически складываются, а во второй — вычитаются. Если для максимальной токовой защиты использованы реле РТ-80, то произойдет замедление ее срабатывания. При $I_{к\min} < I_{с.з}$ защита не сработает вообще. В том, и в другом случае произойдет неселективное отключение трансформатора Т1. Для предотвращения этого не следует применять в максимальной токовой защите реле РТ-80, а чувствительность ее необходимо дополнительно проверять по току $I_{к\min}$.

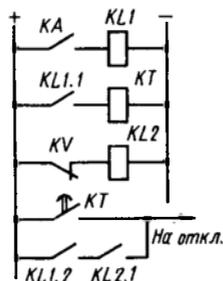


Рис. 15.16. Схема оперативных цепей максимальной токовой защиты с ускорением при срабатывании реле напряжения

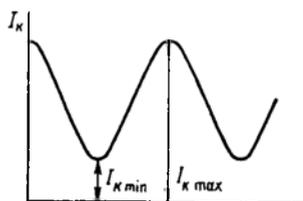


Рис. 15.17. Характер изменения тока короткого замыкания при асинхронном ходе синхронных электродвигателей

2. При внешних коротких замыканиях защита элементов, через которые питаются синхронные электродвигатели, не должна срабатывать от токов, посылаемых синхронными электродвигателями в точку повреждения. Так, например, при выборе параметров срабатывания защит трансформатора $T1$ (см. рис. 15.15, a) необходимо наряду с условиями, обоснованными в гл. 13, обеспечить несрабатывание защит при к.з. в точке K_5 , когда через трансформатор проходит ток, генерируемый синхронными электродвигателями $M1$ и $M2$.

3. При действии устройств АПВ и АВР необходимо исключить несинхронное включение синхронных электродвигателей. Для предотвращения несинхронного включения синхронных электродвигателей при действии УАВР и УАПВ линий и трансформаторов, через которые питаются синхронные электродвигатели, предусматривается защита от потери питания (см. § 13.9), а в схемы УАВР и УАПВ вводят дополнительный пусковой орган в виде минимального реле напряжения. Оно контролирует напряжение со стороны электродвигателей и разрешает включение только после снижения этого напряжения до допустимого значения, принимаемого обычно равным $0,5U_{д.ном}$. Появляются также дополнительные требования при выборе времени срабатывания УАПВ $t_{АПВ}$. Для устройства АПВ линии с односторонним питанием (см. рис. 15.15, a , линия $Л1$) наряду с требованиями, изложенными в § 10.1, должно выполняться условие

$$t_{АПВ} \geq t_{п.п} + t_{с.н} + t_{д.с} + t_{зап}, \quad (15.13)$$

где $t_{п.п}$ — время срабатывания защиты от потери питания составляет около 2 с; $t_{с.н}$ — время снижения контролируемого напряжения до значения $0,5U_{д.ном}$ (находится в пределах от 0,5 до 2 с); $t_{д.с}$ — время деионизации среды; $t_{зап}$ — время запаса (указаны в § 10.1).

Выбор времени $t_{АПВ}$ устройств АПВ на линиях с двусторонним питанием рассмотрен в § 10.4, однако при наличии в системе электроснабжения синхронных электродвигателей необходимо дополнительно учитывать время $t_{п.п}$ и $t_{с.н}$. Как отмечалось выше (см. § 13.9), АПВ трансформаторов разрешается обычно только после действия защиты от внешних к.з. Эта защита, как и защита от потери питания, может действовать на развозбуждение синхронных электродвигателей. В таком случае при определении $t_{АПВ}$ устройства АПВ трансформатора по условию (15.13) время $t_{п.п}$ учитывать не следует.

4. При кратковременной потере питания и последующем АПВ или АВР необходимо исключить срабатывания устройства АЧР, контролирующего частоту напряжения на секции шин, к которой под-

ключены синхронные электродвигатели. При кратковременной потере питания синхронный электродвигатель переходит в режим работы синхронного генератора и в течение нескольких секунд поддерживает напряжение на потерявшей питание секции шин. Значение и частота этого напряжения постепенно снижаются. Это может привести к излишним срабатываниям устройства АЧР, контролирующего частоту напряжения на указанной секции шин. Для исключения излишних срабатываний в схему УАЧР вводят различные блокировки.

Блокировка по направлению мощности. Для этой цели может быть использована защита от потери питания (см. § 13.9).

Блокировка по частоте напряжения на резервной секции шин. При понижении частоты в системе электроснабжения одновременно понижается частота напряжения на обеих секциях шин (см. рис. 13.17). В случае же потери питания понижается только частота напряжения, поддерживаемого синхронными электродвигателями на потерявшей питание секции шин. Схема блокировки выполняется так, что в первом случае она разрешает действовать устройству АЧР, а во втором не разрешает.

Блокировка по скорости снижения частоты. Она основана на использовании различия в скорости снижения частоты при дефиците активной мощности в системе электроснабжения и в режиме потери питания. В первом случае скорость снижения частоты не превышает 3 Гц/с, а во втором она в несколько раз больше. Блокировка выполняется так, что устройство АЧР действует только при скорости снижения частоты не более 3 Гц/с.

5. При наличии на ответвительных подстанциях с отделителями и короткозамыкателями синхронных электродвигателей необходимо учесть их влияние на выбор времени отключения отделителя t_{QR} и выдержки времени $t_{АПВ}$ устройства АПВ питающей линии. При повреждении, например, трансформатора $T2$ на подстанции B (рис. 15.18) его защита $A3$ включает короткозамыкатель $QN2$. Далее защита линии $A1$ с выдержкой времени $t_{с.з.1}$ отключает выключатель $Q1$, но бестоковая пауза при этом не наступает, так как через отделитель $QR2$ и короткозамыкатель $QN2$ продолжает проходить ток $I_{к.в}$, генерируемый синхронными электродвигателями $M1$ и $M2$ подстанции B . Этот ток

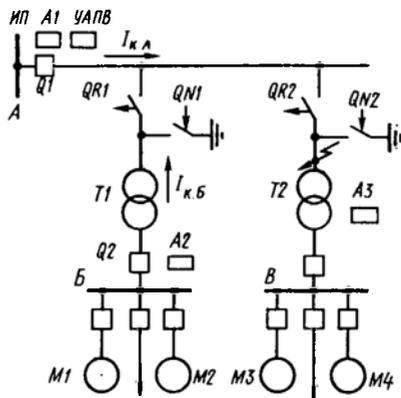


Рис. 15.18. Схема электроснабжения ответвительных подстанций с короткозамыкателями и отделителями

прекращается после того, как подействует защита $A2$ от потери питания на подстанции B и снимет возбуждение с синхронных электродвигателей с выдержкой времени $t_{п.п.}$. Для того чтобы отключение отделителя $QR2$ на подстанции B произошло в бестоковую паузу, необходимо выполнить условие

$$t_{QR} \geq t_{c.э1} + t_{п.п} + t_{c.н} + t_{зап}. \quad (15.14)$$

Если защита от потери питания отключает выключатель $Q2$, то в выражении (15.14) время $t_{c.н}$ не учитывается. Очевидно, АПВ линии будет успешным только после отключения отделителя $QR2$, поэтому при выборе времени действия $t_{АПВ1}$ устройства АПВ необходимо, чтобы обеспечивалось условие

$$t_{АПВ1} \geq t_{QR} + t_{зап}, \quad (15.15)$$

где $t_{зап}$ — время запаса; с учетом собственного времени отключения отделителя принимается 1—1,2 с.

Глава 16

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

§ 16.1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

В системах электроснабжения применяются различные электроустановки специального назначения: конденсаторные, электропечные, преобразовательные и др. В процессе эксплуатации они, как и другие элементы системы электроснабжения, могут повреждаться. Опасны также ненормальные режимы работы, сопровождающиеся прохождением сверхтоков, снижающих срок службы оборудования. Поэтому электроустановки снабжаются защитой от повреждений и ненормальных режимов. Предусматриваются также различные устройства автоматики. Нормальная работа электроустановок, как и других элементов системы электроснабжения, зависит от надежности и бесперебойности не только электроснабжения, но и других систем энергоснабжения: водоснабжения, теплоснабжения, воздухоснабжения, газоснабжения. Ниже рассмотрены защита и автоматика различных электроустановок.

§ 16.2. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Устройства защиты. Конденсаторные установки, присоединяемые параллельно к приемникам электроэнергии, предназначаются для повышения коэффициента мощности в системе электроснабжения. Их используют и для местного регулирования напряжения, поэтому конденсаторные установки снабжаются автоматическими регуляторами напряжения (АРН). Основной вид повреждений кон-

денсаторных установок — пробой конденсаторов — приводит к двухфазному короткому замыканию. В условиях эксплуатации возможны также ненормальные режимы, связанные с перегрузкой конденсаторов высшими гармоническими токами и повышением напряжения. От повреждений и ненормальных режимов конденсаторных установок предусматривается защита, действующая при многофазных коротких замыканиях, перегрузках и повышении напряжения. Конденсаторная установка состоит из одного или нескольких отдельно установленных единичных конденсаторов, присоединенных к сети через коммутационные аппараты. Электрически соединенные между собой единичные конденсаторы образуют конденсаторную батарею с единым коммутационным аппаратом. В общем случае конденсаторная установка может содержать и единичные конденсаторы, и конденсаторные батареи.

Защита от многофазных коротких замыканий предусматривается для всей конденсаторной установки в целом. В сетях напряжением до 1 кВ она выполняется плавкими предохранителями или автоматическими выключателями, а в сетях напряжением выше 1 кВ — плавкими предохранителями или двухфазной токовой отсеккой. Кроме того, предусматривается групповая защита батарей, из которых состоит установка. Групповая защита не требуется, если конденсаторы снабжены индивидуальной защитой. Групповая защита и защита конденсаторов выполняются предохранителями.

Номинальный ток плавкой вставки предохранителя и ток срабатывания защиты выбирают с учетом отстройки от токов переходного процесса при включении конденсаторной установки и толчков тока при перенапряжениях по условию $I_{с.з} = I_{нс.ном} = k_{отс} I_{к.у.ном}$, где $I_{к.у.ном}$ — номинальный ток конденсаторной установки или отдельных ее элементов (для групповой защиты и защиты секций); $k_{отс} = 2,0 \dots 2,5$. Более высокие значения коэффициента отстройки $k_{отс}$ принимают для плавких вставок. Чувствительность защиты считается достаточной при $k_{ч} \geq 2$.

Защита от перегрузки предусматривается в тех случаях, когда возможна перегрузка конденсаторов высшими гармоническими токами из-за непосредственной близости мощных выпрямительных установок. Защита выполняется общей для всей конденсаторной установки и действует на ее отключение с выдержкой времени порядка $t_{с.з} = 9$ с. Ток, срабатывания защиты определяется условием $I_{с.з} \geq 1,3 I_{к.у.ном}$.

Защита от повышения напряжения устанавливается, если при повышении напряжения к единичному конденсатору может быть длительно приложено напряжение более $1,1 U_{ном}$. Защита выполняется одним максимальным реле напряжения и реле времени. Напряжение срабатывания определяется условием $U_{с.з} = 1,1 U_{ном}$, а выдержка времени принимается равной $t_{с.з} = 3 \dots 5$ мин. Предусматривается автоматическое повторное включение

конденсаторной установки после восстановления первоначального уровня напряжения, но не ранее чем через 5 мин после ее отключения.

Устройства автоматического регулирования напряжения. Автоматическое регулирование напряжения выполняется одноступенчатым, когда автоматически включается (отключается) вся конденсаторная установка, или многоступенчатым, когда включаются (отключаются) отдельные батареи или единичные конденсаторы.

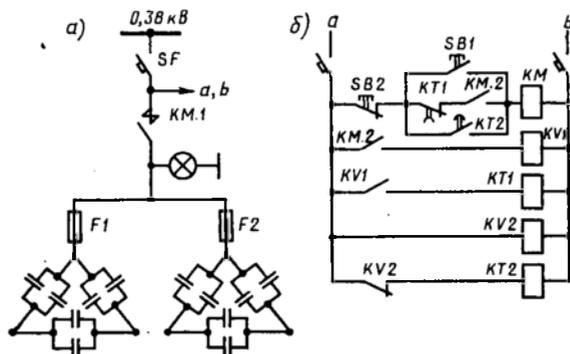


Рис. 16.1. Схема одноступенчатого управления конденсаторной установкой в функции напряжения

Оно может осуществляться в функции напряжения, тока нагрузки, значения или знака реактивной мощности, времени суток (программное управление с помощью контактных электрических часов).

Одноступенчатое регулирование напряжения в связи с включением (отключением) всей установки имеет большие зоны нечувствительности и допускает значительные отклонения

напряжения, что в ряде случаев нежелательно. При одноступенчатом автоматическом регулировании напряжения на шинах 0,38 кВ может применяться схема, приведенная на рис. 16.1, а, б, на которой показаны элементы защиты конденсаторной установки (предохранители $F1$, $F2$ и автоматический выключатель SF).

Регулирование осуществляется в функции напряжения, поэтому схема содержит максимальное реле напряжения $KV1$ и минимальное реле напряжения $KV2$. Реле $KV1$ срабатывает при повышении напряжения на шинах 0,38 кВ, а реле $KV2$ — при его снижении. Чтобы автоматика не действовала при кратковременных колебаниях напряжения, управляющие воздействия на контактор KM , подключающий конденсаторную установку к шинам, подаются контактами реле времени $KT1$ и $KT2$ через $t=15$ с после срабатывания соответствующего реле напряжения. В эксплуатации имеются и другие схемы управления конденсаторной установкой в функции напряжения. Однако некоторые из них (см., например, [155]) имеют ряд существенных недостатков, отмеченных в [156].

На рис. 16.2, б показана схема защиты и одноступенчатого регулирования напряжения в функции времени конденсаторной установки высокого напряжения (рис. 16.2, а). Контакты электрических часов PT , замыкаясь на $\Delta t=15$ с, включают одно из двух

реле времени $KT1$ или $KT2$ (в зависимости от положения выключателя Q и его вспомогательных контактов $Q.3—Q.4$). При отключенном выключателе работает реле $KT1$ и после выдержки времени $t_1=9...10$ с контактом $KT1$ воздействует на электромагнит YAC

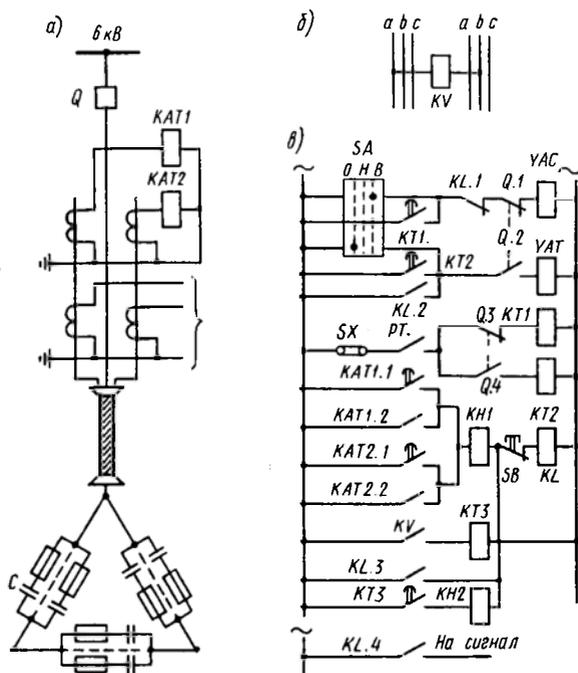


Рис. 16.2. Схема одноступенчатого управления конденсаторной установкой в функции времени

включения выключателя Q . После включения выключателя и переключения его вспомогательных контактов начинает работать реле времени $KT2$, имеющее выдержку времени $t_2=t_1$. Сумма выдержек времени двух реле выбрана большей времени замкнутого состояния контактов PT , поэтому реле времени $KT2$ не успевает доработать и конденсаторная установка остается подключенной к шинам до момента очередного замыкания контактов PT , приводящего к ее отключению. Конденсаторная установка имеет общую защиту от коротких замыканий и перегрузки. Защита выполнена посредством комбинированных реле $KAT1$ и $KAT2$ типа РТ-80. Для защиты от повышения напряжения использованы реле KV и $KT3$. При срабатывании защит промежуточное реле KL самоудерживается (контактом $KL.3$) и разрывает цепь включения выключателя (контактом $KL.1$). Самоудерживание снимается кнопочным выключателем SB . Источником переменного оперативного тока служит

трансформатор собственных нужд подстанции с конденсаторной установкой. Имеются также схемы управления в функции абсолютного значения или знака реактивной мощности. В [157] предложена схема, использующая в качестве измерительного органа счетчики реактивной энергии. Разработано также устройство, в котором измерительный орган выполнен на основе элемента Холла [158].

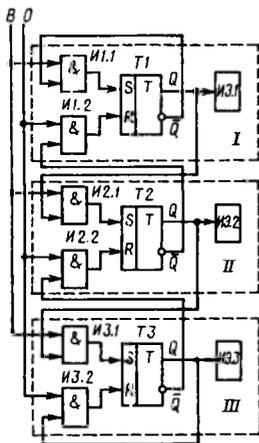


Рис. 16.3. Структурная схема логической части автоматического регулятора для поочередного включения трех секций конденсаторной батареи

Многоступенчатое регулирование позволяет осуществлять автоматический регулятор конденсаторных установок АРКОН. Он состоит из измерительной части (командного блока) и логической части с исполнительными элементами в виде так называемых приставок. Измерительная часть аналогична измерительной части выше рассмотренного регулятора напряжения для трансформаторов (см. § 13.10). В рассматриваемом устройстве регулятор выявляет только направление воздействия: включение или отключение очередной секции конденсаторной батареи. Подлежащая включению или отключению секция определяется логическим алгоритмом приставок. Очередность действия приставок может быть двойкой. В первом случае предполагаются равные мощности конденсаторных батарей, тогда приставки и соответствующие им секции включаются поочередно. Во

втором случае мощности секций берутся неравными для увеличения числа ступеней регулирования. Например, три секции с соотношением мощностей 1:2:4 позволяют получить семь ступеней регулирования с мощностями, относящимися как 1:2:(1+2):4:(1+4):(2+4):(1+2+4).

Структурная схема соединения трех приставок для включения (отключения) секций равной мощности показана на рис. 16.3. Каждая из приставок *I*, *II*, *III* содержит логические элементы *И*, триггер *T* и исполнительный элемент *ИЭ*, управляющий работой секций. В исходном состоянии (до включения секций конденсаторной батареи) в каждой приставке на прямом выходе триггера *Q* сигнал отсутствует — логический 0, а на инверсном \bar{Q} имеется дискретный сигнал — логическая 1.

Если контролируемое напряжение находится в зоне нечувствительности, то в цепях включения *B* и отключения *O* и регулятора — логические 0. При снижении напряжения первая логическая единица — импульс команды включения через *И1.1*, на втором входе которого имеется единица с инверсного выхода *T1*, поступает на триггер *T1*, переключая его. Триггер *T2* первым импульсом не переключается, так как на второй вход логического элемента *И2.1* подается сигнал запрета 0 с прямого выхода триггера *T1*. По этой причине не переключается и триггер *T3*. Переключившись, триггер *T1* выдает команду на действие исполнительного элемента *ИЭ1*, включающего первую секцию, и подает разрешающий сигнал — единицу — на второй вход элемента *И2.1*. В связи с этим

второй импульс команды включения переключает триггер T_2 ; при этом триггер T_1 остается в прежнем положении (так как на втором входе элемента $И1.1$ сигнал запрета — ноль с инверсного выхода $T1$). После переключения триггера T_2 действует исполнительный элемент $ИЭ2$, включающий вторую секцию, и подается разрешающий сигнал на логический элемент $ИЗ.1$. Третий импульс переключает триггер T_3 , при этом включается третья секция конденсаторной батареи. При поступлении сигналов отключения работа устройства происходит аналогично, но в обратном порядке. Необходимую очередность обратного переключения триггеров (сначала T_3 , затем T_2 и T_1) обеспечивают логические элементы $ИЗ.2—И1.2$. На основе рассмотренного устройства разработан регулятор АРКОН-1 [159].

§ 16.3. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРОПЕЧНЫХ УСТАНОВОК

Электродуговые плавильные установки (дуговые сталеплавильные и рудно-термические) являются специфическим потребителем электроэнергии. Они характеризуются сравнительно низкими напряжениями горения дуги. При значительных мощностях печи это обуславливает очень большие токи (десятки килоампер). В процессе электроплавки металла сопротивление дуги сталеплавильной печи резко изменяется, вследствие чего возможны частые эксплуатационные короткие замыкания электродов на металл и обрывы дуги. Все это сопровождается резкими и быстрыми изменениями тока и напряжения. Обрывы дуги вызывают значительные перенапряжения. Нежелательны также высшие гармонические, генерируемые дугой и проникающие в питающую сеть. Рудно-термические печи отличаются более стабильным режимом работы. Для них эксплуатационные короткие замыкания и обрывы дуги маловероятны.

Отмеченные особенности дуговых печей не позволяют подключать их к шинам источника питания. Дуговые сталеплавильные и рудно-термические печи присоединяются к питающим электросетям через отдельные для каждой установки однофазные или трехфазные согласующие электропечные трансформаторы, отличающиеся от обычных силовых трансформаторов.

Электропечные трансформаторы имеют широкий диапазон регулирования коэффициента трансформации и большие токи на стороне низшего напряжения, требующие установки измерительных трансформаторов на токи до $I_1 = 25$ кА и выше. Технологический процесс требует регулирования напряжения печи. Это осуществляется переключением секций обмотки высшего напряжения. Трансформаторы для печей средней и большой мощности снабжаются устройствами РПН. Напряжение на печи изменяют также переключением схемы соединения обмоток высшего напряжения трансформатора с треугольника на звезду. Трансформаторы дуговых электропечных установок выполняются с повышенной динамической стойкостью, причем для ограничения тока эксплуа-

тационного короткого замыкания примерно до трехкратного значения номинального тока желательнее иметь трансформатор с большим реактивным сопротивлением. В ряде случаев оно оказывается недостаточным, поэтому последовательно с трансформатором включают реактор.

Устройства защиты. Для трансформаторов электропечных установок предусматривают следующие виды защит: токовую защиту без выдержки времени от многофазных коротких замыканий; токовую защиту от перегрузки; газовую защиту; защиту от однофазных коротких замыканий на землю. Несмотря на значительную мощность трансформаторов электропечных установок ($P_T \geq \geq 60 \text{ МВ} \cdot \text{А}$), дифференциальная защита не предусматривается. Ее выполнение затруднено тем, что трансформаторы тока со стороны низшего напряжения отсутствуют или имеют характеристики, резко отличающиеся от характеристик трансформаторов тока со стороны питания.

Токовая защита без выдержки времени от многофазных коротких замыканий в двухфазном, двух- или трехрелейном исполнении устанавливается со стороны питания с током срабатывания $I_{с.з}^I = k_{отс}^I I_{T,ном}$, где коэффициент отстройки $k_{отс}^I = 2,0 \dots 3,0$ для руднотермических печей и $k_{отс}^I = 3,0 \dots 4,5$ для дуговых сталеплавильных печей. Повышенные значения $k_{отс}^I$ обеспечивают отстройку от токов эксплуатационных коротких замыканий, ликвидируемых устройством автоматического регулирования мощности.

В общем случае токи эксплуатационных к. з. могут незначительно отличаться от токов к. з. при повреждении на стороне низшего напряжения трансформатора, поэтому защита может оказаться нечувствительной к этим повреждениям. Имеется ряд предложений, направленных на устранение этого недостатка. Разработана, например, защита, действующая в зависимости от скорости изменения тока и напряжения [160].

Токовая защита от перегрузки включается через трансформаторы тока, установленные на стороне низшего напряжения. Если они отсутствуют, то используют трансформаторы тока со стороны питания. Для выполнения защиты используют реле РТ-80. Учитывая возможность несимметрии токов фаз, защиту от перегрузки выполняют трехфазной. Параметры ее срабатывания выбирают таким образом, чтобы при токе срабатывания $I_{с.з.}^{III} = (1,4 \dots 1,5) I_{T,ном}$ выдержка времени составляла $t_{с.з.}^{III} \approx 10 \text{ с}$. При этом также обеспечивается отстройка от токов эксплуатационных к. з.

Газовая защита устанавливается согласно общим положениям, изложенным выше (см. § 13.2).

Защита от однофазных коротких замыканий на землю предусматривается, если это требуется по условиям работы сети с глухозаземленной нейтралью.

Устройство автоматического регулирования мощности. Автоматизация технологического процесса электропечной установки предусматривает [161] быструю ликвидацию нарушения режима работы печи, поддержание мощности печи на определенном уровне и изменение напряжения, питающего печь, в соответствии с программой. Для восстановления режима работы печи используют автоматический регулятор мощности (АРМ), который воздействует на привод перемещения электродов. Напряжение и мощность регулируют переключением ступеней напряжения электропечного трансформатора.

Часто эту операцию выполняют вручную.

Встречаются устройства АРМ различных типов: с электромашинным усилителем, с магнитными и полупроводниковыми усилителями, электрогидравлические регуляторы с различной системой приводов.

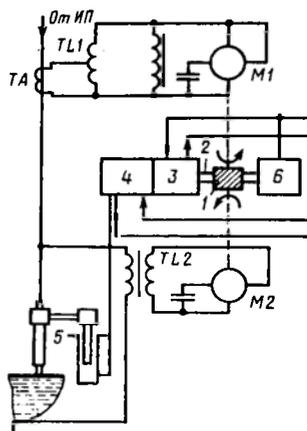


Рис. 16.4. Принципиальная схема электрогидравлического регулятора

Электрогидравлический регулятор со следящим золотником дроссельного типа [161] действует в зависимости от изменения соотношения между напряжением и током фазы электропечной установки, стремясь поддерживать это соотношение на уровне, соответствующем заданной мощности (рис. 16.4). Соотношение между напряжением и током контролируется измерительным органом, состоящим из двухфазных конденсаторных асинхронных электродвигателей $M1$ и $M2$, жестко соединенных друг с другом валом. На валу расположено зубчатое колесо 1 , сцепленное с рейкой 2 . При вращении вала зубчатое колесо 1 перемещает рейку 2 , которая воздействует на шток управляющего золотника 3 и через него на золотник гидроусилителя 4 и плунжер силового цилиндра 5 , перемещающего электрод. Вращающий момент электродвигателя $M1$ определяется значением фазного тока, а момент электродвигателя $M2$ — значением фазного напряжения. Моменты направлены в противоположные стороны. Для заданного режима они равны и система неподвижна. Появление толчков тока свидетельствует о возникновении эксплуатационных коротких замыканий. При этом момент электродвигателя $M1$ возрастает и регулятор действует так, что плунжер 5 поднимает электрод. При снижении тока вследствие обрыва дуги или по другим причинам результирующий момент на валу изменяет направление и электрод опускается. В регуляторе предусмотрен демпфер 6 , не позволяющий системе реагировать на кратковременные нарушения режима.

Одна из схем регулятора мощности с реверсивным тиристорным преобразователем рассмотрена в [162]. Измерительный орган устройства состоит из двух сельсинов. Один из них контролирует ток, а другой — напряжение дуговой электропечи. Напряжения с выходов сельсинов выпрямляются и сравниваются в узле сравнения. Разность этих напряжений усиливается реверсивным тири-

торным преобразователем, питающим электродвигатель перемещения электродов.

§ 16.4. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

Преобразовательные установки на основе функциональных признаков подразделяются на выпрямительные, инвертирующие, преобразующую частоту, преобразующие число фаз и др. В нашей стране около 25% всей электроэнергии, производимой при синусоидальной форме напряжения, преобразуется выпрямительными установками для обеспечения электроснабжения электропривода постоянного тока и электрифицированного транспорта, гальванических ванн и электрометаллургических установок, обмоток возбуждения синхронных электрических машин и электрохимических установок. В выпрямительных установках наибольшее применение нашли силовые полупроводниковые преобразователи, состоящие из неуправляемых (диодов) или управляемых (тиристоров) вентилях. Полупроводниковые преобразователи оборудуются системой воздушного или водяного охлаждения, а также приборами и аппаратами, необходимыми для пуска и работы преобразователей. К питающей сети переменного тока они подключаются через трансформатор, образуя преобразовательный агрегат. К повреждениям преобразовательного агрегата относятся повреждения трансформатора, а также короткие замыкания в системе переменного тока и пробой полупроводниковых вентилях, т. е. потеря ими запирающих свойств. При пробое возможны образование электрической дуги в поврежденном вентиле и его взрыв, сопровождающийся пересбросом дуги на токоведущие части преобразователя. Ненормальными режимами преобразовательного агрегата являются прохождение сверхтоков при перегрузках и внешних коротких замыканиях в системе выпрямленного тока и нарушение работы устройств собственных нужд установки.

Устройства защиты трансформатора. Основными защитами трансформатора преобразовательного агрегата являются максимальная токовая защита без выдержки времени от многофазных коротких замыканий в обмотках и на выводах трансформатора, газовая защита и токовая защита от перегрузки, если нет защиты от перегрузки полупроводникового преобразователя. В зависимости от типовой мощности и первичного напряжения трансформатора предусматриваются и другие защиты [3].

Токовая защита без выдержки времени в установках с первичным напряжением выше 1 кВ делается, как правило, выполняться двухфазной трехрелейной с помощью реле РТ-40. При недостаточной чувствительности рекомендуется использовать реле РНТ-565 (рис. 16.5). Ток срабатывания защиты выбирается

по условию $I'_{с.з} = k_{отс} I_{т.ном}$. Коэффициент $k'_{отс}$ принимается с учетом отстройки от бросков тока намагничивания при включении ненагруженного трансформатора и от возможных толчков тока нагрузки. При использовании реле РТ-40 с выходным промежуточным реле, имеющим время срабатывания 0,1—0,15 с, $k'_{отс} = 3 \dots 4$. Для реле РНТ-565 достаточно принять $k'_{отс} = 1,3$. Защита, как правило, должна быть селективной по отношению к предохранителям F полупроводниковых вентилях и к автоматическим выключателям $SF2$ на стороне выпрямленного напряжения (рис. 16.5). Если при двухфазных к.з. на стороне низшего напряжения коэффициент чувствительности $k_q < 1,5$, то предусматривается вторая ступень защиты с выдержкой времени $t'_{с.з} = 0,5$ с. В установках с первичным напряжением до 1 кВ защиту трансформатора выполняют максимальными расцепителями автоматического выключателя, включаемыми в две фазы при изолированной нейтрали и в три фазы при глухозаземленной нейтрали сети первичного напряжения.

Газовая защита от внутренних повреждений и понижения уровня масла устанавливается на трансформаторах мощностью $P_T \geq 1000$ кВ·А, а для внутрицеховых преобразовательных подстанций и установок — на трансформаторах мощностью $P_T \geq 400$ кВ·А.

Защита от перегрузки обычно выполняется с использованием реле РТ-80. Ток срабатывания защиты определяется из условия отстройки от номинального тока преобразователя $I'''_{с.з} = (k'''_{отс}/k_B) I'_{ном}$, где $k'''_{отс} = 1,1$; $k_B = 0,8$; $I'_{ном}$ — приведенный к первичному напряжению трансформатора номинальный выпрямленный ток преобразователя. Значение $I'_{ном}$ определяется из выражения $I'_{ном} = k_1 I_{d ном} \times U_2/U_1$, где $k_1 = 0,82 \dots 0,408$ — коэффициент, зависящий от схемы питания выпрямителей; $I_{d ном}$ — номинальный выпрямленный ток преобразователя; U_1 и U_2 — соответственно высшее и низшее напряжения трансформатора. Характеристику времени действия реле РТ-80 выбирают такой, чтобы обеспечивалась перегрузочная способность преобразовательного агрегата.

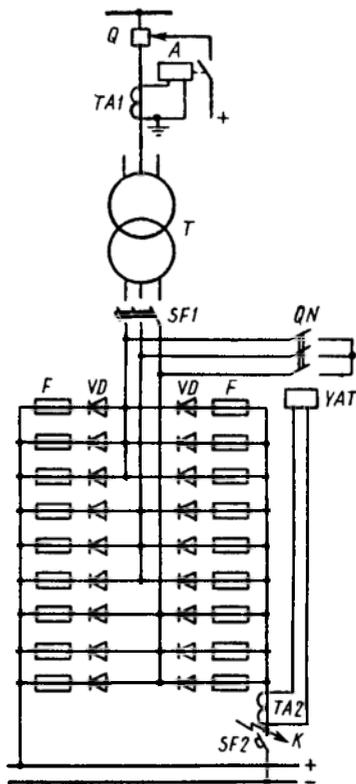


Рис. 16.5. Защита полупроводникового преобразовательного агрегата

Защита полупроводникового преобразователя. Дополнительно к защите трансформатора на полупроводниковом преобразователе предусматриваются устройства защиты, для выполнения которых используют быстродействующие электромагнитные автоматические выключатели, вакуумные и взрывные выключатели, импульсные дуговые коммутаторы; полупроводниковые тиристорные выключатели; быстродействующие токоограничивающие плавкие предохранители; предохранители многократного действия (жидкометаллические). Принципы действия и область применения этих аппаратов рассмотрены в [35]. Для защиты от пробоя вентиляльных преобразователей используют быстродействующие плавкие предохранители F , устанавливаемые последовательно с вентилями в каждую параллельную ветвь (рис. 16.5). Селективное действие предохранителей обеспечивается тем, что при повреждении одного из вентилях весь ток к.з. проходит только через предохранитель этого вентиля, а в двух других фазах ток к.з. распределяется по всем параллельно включенным предохранителям. При равенстве номинальных токов плавких вставок перегорит предохранитель в цепи с бóльшим током, т. е. в цепи поврежденного вентиля, и установка продолжает работать с меньшим числом параллельно включенных вентилях. Селективность обычно обеспечивается при наличии не менее трех параллельных ветвей.

Для защиты полупроводниковых вентилях используют, например, предохранители ПП57, имеющие высокое быстродействие порядка 0,003 с при $I_{вс}/I_{вс,ном}=5$. Вентиля полупроводникового преобразователя должны быть также защищены от сверхтока при внешних коротких замыканиях. Такая защита обеспечивается быстродействующим неполяризованным автоматическим выключателем $SF2$ в одном полюсе на стороне выпрямленного напряжения. При этом внешние короткие замыкания до выключателя $SF2$ (в точке K на рис. 16.5) будут ликвидироваться максимальной токовой защитой без выдержки времени преобразовательного агрегата.

Если вентиля выбраны по току нагрузки и не выдерживают проходящие по ним токи при внешних повреждениях в течение времени действия максимальной токовой защиты без выдержки времени и времени отключения выключателя или если эта защита оказывается нечувствительной, то применяют быстродействующие короткозамыкатели QN (рис. 16.5), управляемые от импульсного трансформатора тока $TA2$ или элементов другого типа. При срабатывании короткозамыкатель закорачивает выводы низшего напряжения трансформатора, резко ограничивая ток в вентилях преобразователя. Возникший режим искусственного короткого замыкания устраняется токовой защитой трансформатора, отключающей выключатель Q . Применяемый короткозамыкатель имеет время срабатывания $t_{с.к}=0,001..0,005$ с и допускает прохождение тока до $I_k=70$ кА в течение времени ликвидации искусственного

к.з. Следует сказать, что защита с применением короткозамыкателей применяется редко, главным образом для мощных преобразовательных агрегатов. Необходимость в такой защите отпадает, если вентили выбираются из расчета, что каждый вентиль выдерживает проходящий по нему сверхток при внешних к. з. в течение времени ликвидации этого повреждения. Если в полупроводниковом преобразователе использованы тиристоры, то для их защиты от сверхтоков при внешних к.з. может быть рекомендована защита по управляющему электроду с использованием ЖСП (см. § 15.6).

Устройства автоматики. Для повышения надежности электропитания потребителей постоянного тока используются устройства АПВ и АВР. На одноагрегатных выпрямительных установках находит применение общее УАПВ всего агрегата или УАПВ автоматических выключателей на стороне выпрямленного напряжения. В установках с числом агрегатов более одного вместо агрегатных УАПВ применяется одно общее устройство АВР.

При питании выпрямительной установки от двух источников (линий напряжением не более 10 кВ или трансформаторов 110/10 кВ) в распределительном устройстве переменного тока применяется двойная или одиночная секционированная система шин, а выпрямительные агрегаты разбиваются на две группы, подключаемые к разным шинам. В этом случае можно выполнить устройство АВР, действующее на включение шиносоединительного (или секционного) выключателя при отключении одного из источников переменного тока. Однако эффективность действия этого устройства АВР снижается, если на стороне постоянного тока все агрегаты работают на общую нагрузку. Действительно, при отключении одного из источников питания нагрузка выпрямительных агрегатов, питаемых от второго источника, возрастает и они могут быть отключены защитой до момента действия АВР. Включение шиносоединительного (секционного) выключателя не приводит к восстановлению нормального питания, а вызывает лишь отключение второй половины агрегатов. Следовательно, рассматриваемое устройство АВР повышает надежность электропитания лишь в тех случаях, когда агрегаты способны нести аварийную перегрузку в течение времени срабатывания устройства АВР.

§ 16.5. ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ШИН

Защита шин. Короткие замыкания на шинах в системе электропитания могут возникнуть из-за загрязнения или повреждения шинных изоляторов, втулок выключателей и измерительных трансформаторов тока, а также при ошибочных действиях персонала с шинными разъединителями. Повреждения на шинах маловероятны. Однако, учитывая весьма тяжелые последствия, к которым

эти повреждения могут привести, необходимо иметь защиту, действующую при повреждении шин.

Устройства защиты должны быстро и правильно отключать все короткие замыкания на шинах. Для этого принципиально можно использовать защиты с относительной селективностью питающих элементов, присоединенных к шинам. Однако эти защиты обычно имеют большие выдержки времени и не всегда действуют селективно. Например, когда короткие замыкания на шинах приемной подстанции, получающей питание по линии с ответвлениями, отключаются защитой линии, установленной на питающей подстанции, ответвления теряют питание. Поэтому в тех случаях, когда защита питающих элементов не обеспечивает необходимых быстродействия и селективности, предусматриваются специальные защиты шин: токовые, токовые направленные, дистанционные и дифференциальные. Наиболее часто используются дифференциальные защиты. Они обязательны для шин 110 кВ и выше, но применяются и для шин 35 кВ ответственных пони-

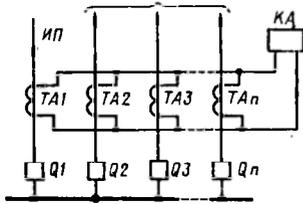


Рис. 16.6. Дифференциальная защита шин

тельных подстанций. Для шин напряжением 6—10 кВ защита выполняется по упрощенным схемам.

Для выполнения дифференциальной защиты используют трансформаторы тока с одинаковыми коэффициентами трансформации независимо от мощности присоединения или принимают меры по выравниванию токов плеч.

Дифференциальная токовая защита шин на напряжении 35 кВ и выше электрических станций и подстанций охватывает все элементы, которые присоединены к системе или секции шин (рис. 16.6). При этом число трансформаторов тока оказывается значительным и вероятность обрыва их вторичных цепей повышена. Это учитывается при выборе тока срабатывания защиты по условию $I_{с.з} \geq k_{отс} I_{раб\ max}$, где $I_{раб\ max}$ — ток наиболее мощного присоединения. При возникновении обрыва защита автоматически с выдержкой времени выводится из действия. Для этого в обратный провод дифференциальной цепи включается реле тока, срабатывающее при обрыве вторичных цепей любого трансформатора тока, в том числе и трансформаторы тока наименее мощного трансформатора. Как и любая дифференциальная защита, дифференциальная защита шин не должна срабатывать при внешних коротких замыканиях. Поэтому при выборе тока срабатывания необходимо учесть второе условие, по которому $I_{с.з} \geq k_{отс} I_{нб.реч\ max}$. Часто это условие является определяющим из-за больших кратностей токов внешних к.з. и значительных апериодических составляющих ($k_{ан} \approx 2$). Для повышения чувствительности защиты рекомендуется использовать реле типа РНТ или реле с

матора собственных нужд (рис. 16.7). Защита выполняется двухступенчатой. Она содержит первую и третью ступени. Первая ступень (реле $KA1$) — токовая отсечка без выдержки времени — является основной. Она может выполняться также в виде комбинированной отсечки по току и напряжению. Третья ступень (реле $KA2$ и KT) — максимальная токовая защита — резервирует первую ступень и защиты отходящих линий $L1$ и $L2$, не охваченных дифференциальной защитой. При внешних коротких замыканиях на присоединениях, охваченных дифференциальной защитой, в реле проходит только ток небаланса. Однако в нормальном режиме и при к. з. на одной из отходящих линий, например в точке K_1 , в защите проходит ток, равный сумме токов линий $L1$ и $L2$. В нормальном режиме это максимальные рабочие токи $I_{\text{раб.мах}1}$ и $I_{\text{раб.мах}2}$, а при коротком замыкании это ток повреждения $I_{\text{к.зн.мах}}^{(3)}$ и максимальный рабочий ток неповрежденной линии $I_{\text{раб.мах.нп}}$. Эти режимы и являются расчетными при выборе параметров защиты. При этом учитывается случай, когда в результате действия УАВР вся или часть нагрузки секции II с током $I_{\text{раб.доп}}$ переключается на защищаемую секции I [163]. Для первой ступени защиты расчетным является к. з. за реактором (точка K_1 на рис. 16.7). При этом

$$I_{\text{с.з}}^I = k_{\text{отс}}^I [I_{\text{к.зн.мах}}^{(3)} + k_{\text{нп}} (I_{\text{раб.мах.нп}} + I_{\text{раб.доп}})].$$

Коэффициент $k_{\text{нп}}$ учитывает возможное увеличение тока всех неповрежденных линий. Ориентировочно принимают $k_{\text{нп}} = 1,2$. Допускается иметь коэффициент чувствительности $k_{\text{ч}} > 1,5$. Чувствительность отсечки можно повысить, если выполнить ее комбинированной по току и напряжению. В этом случае ток срабатывания отсечки выбирается с учетом [163]:

отстройки от максимального рабочего тока защищаемой секции $I_{\text{раб.мах}}$ при подключении к ней устройством АВР нагрузки другой секции с током $I_{\text{раб.доп}}$

$$I_{\text{с.з}}^I \geq (k_{\text{отс}}^I / k_{\text{ч}}) (I_{\text{раб.мах}} + I_{\text{раб.доп}});$$

отстройки от тока небаланса $I_{\text{нб.реч.мах}1}$ и токов подпитки от асинхронных $I'_{\text{а.д}}$ и синхронных $I''_{\text{с.д}}$ электродвигателей при внешних к. з. на присоединениях охваченных дифференциальной защитой, например в точке K_2 (рис. 16.7)

$$I_{\text{с.з}}^I \geq k_{\text{отс}}^I I_{\text{нб.реч.мах}1} + k'_{\text{отс}} I'_{\text{а.д}} + k''_{\text{отс}} I''_{\text{с.д}},$$

где $k_{\text{отс}}^I = 1,5$; $k'_{\text{отс}} = 0,6$; $k''_{\text{отс}} = 1,2$; токи $I'_{\text{а.д}}$ и $I''_{\text{с.д}}$ определяют для $t=0$, $I_{\text{нб.реч.мах}1}$ обусловлен погрешностью трансформаторов тока.

Напряжение срабатывания комбинированной отсечки определяется по условию отстройки от минимального напряжения при трехфазном к. з. за реактором линии. При этом необходимо при-

нять $I_{к}^{(3)} = I_{с.з.}$, тогда

$$U_{с.з.}^I = \sqrt{3} I_{с.з.}^I X_p / k_{отс.}^I,$$

где X_p — сопротивление реактора.

Ток срабатывания третьей ступени $I_{с.з.}^{III}$ выбирают исходя из двух условий:

по условию возврата реле после отключения поврежденной линии собственной защитой при к.з. за реактором

$$I_{с.з.}^{III} \geq (k_{отс.}^{III} k_{сзп.} / k_{в.}) (I_{раб. \max \text{ нп}} + I_{раб. \text{ доп}}),$$

где $k_{сзп.} = 1, 2 \dots 1, 3$;

по условию несрабатывания реле в момент переключения устройством АВР у потребителей нагрузки поврежденной секции II, отключенной собственной защитой,

$$I_{с.з.}^{III} \geq k_{отс.}^{III} (I_{раб. \max \text{ нп}} + k_{сзп.} I_{раб. \text{ доп}}),$$

где $k_{сзп.} = 2, 5 \dots 3$.

Выдержка времени защиты $t_{с.з.}^{III}$ принимается на ступень селективности Δt больше максимального времени срабатывания $t_{л. \max}$ защит линий $t_{с.з.}^{III} = t_{л. \max} + \Delta t$. Третья ступень является резервной для защит питаемых линий, поэтому при двухфазном к.з. за реактором линии коэффициент чувствительности должен быть $k_{\chi}^{III} \geq 1, 2$. Специальная защита шин 6—10 кВ подстанций обычно не предусматривается. При этом к.з. на шинах ликвидируются с выдержкой времени защитами трансформаторов от внешних коротких замыканий и защитами, установленными на секционном или шиносоединительном выключателе. Если согласовать действие этих защит с действием защит других присоединений защищаемой секции шин, то к.з. на шинах можно ликвидировать без выдержки времени. Это достигается путем косвенного сравнения контролируемых электрических величин.

Защиты питающих присоединений приходят в действие как при повреждении на шинах, так и при внешних коротких замыканиях, а защиты отходящих присоединений срабатывают только при повреждении на защищаемом присоединении. Если защиты отходящих присоединений не запускаются, а защиты питающих присоединений приходят в действие, то место короткого замыкания находится на шинах. В этом случае защиты питающих присоединений должны отключать соответствующие выключатели без выдержки времени.

При повреждении на одном из присоединений его защита запускается и не позволяет защитами питающих присоединений действовать без выдержки времени. Для получения такого согласованного действия защит требуется объединять их оперативные цепи. Кроме того, для отстройки от токов подпитки электродвигате-

лей в защиты отходящих присоединений иногда вводят реле направления мощности, что усложняет схему.

Устройства автоматики обеспечивают автоматическое включение шин. Если шины не имеют специальной защиты, то восстановление напряжения на них осуществляется устройствами АПВ питающих присоединений. При наличии специальной защиты шин можно применять отдельные устройства АПВ шин, запускаемые этой защитой. С помощью УАПВ напряжение на шины подается сначала от одного из отключившихся питающих присоединений (т. е. делается опробование шин), а затем, если опробование шин оказывается успешным, включаются остальные присоединения.

Одной из разновидностей устройств является УАПВ с контролем напряжения на шинах. Такое устройство АПВ разрешает включение первого присоединения при отсутствии напряжения на шинах, а включение остальных присоединений — при наличии напряжения. Недостатком УАПВ с контролем напряжения является то, что при отказе на включение выключателя, который должен включаться первым, АПВ шин вообще не происходит. От этого недостатка свободно УАПВ шин с запретом действия (блокировкой) при повторном срабатывании защиты шин. Запрет выполняется с помощью дополнительного промежуточного реле, которое само удерживается после первого срабатывания защиты шин. Если защита срабатывает повторно, то создаются цепи запрета, выполненные последовательно соединенными контактами защиты и дополнительного промежуточного реле. При успешном АПВ шин самоудерживание снимается по истечении некоторого времени.

1. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года. М., 1986. 93 с.
2. Энергетика СССР в 1986—1990 годах/М. С. Воробьев, Ю. К. Воскресенский, Ю. А. Гончаров и др.; Под ред. А. А. Троицкого. М., 1987. 35 с.
3. Правила устройства электроустановок. М., 1986. 646 с.
4. Гилоян Г. Г. Релейная защита горных электроустановок. М., 1978. 349 с.
5. Марквард К. Г. Энергоснабжение электрических железных дорог: Учеб. для вузов. М., 1965. 464 с.
6. Сердинов С. М. Анализ работы и повышение надежности устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог. М., 1975. 365 с.
7. Дорогунцев В. Г., Овчаренко Н. И. Элементы автоматических устройств энергосистем: Учеб. пособие для вузов. М., 1979. 520 с.
8. Фабрикант В. Л. Основы теории построения измерительных органов релейной защиты и автоматики (Органы с двумя электрическими величинами). М., 1968. 267 с.
9. Теоретические основы построения логической части релейной защиты и автоматики энергосистем/В. Е. Поляков, С. Ф. Жуков, Г. М. Проскурин и др.; Под ред. В. Е. Полякова. М., 1979. 237 с.
10. Федосеев А. М. Релейная защита электроэнергетических систем: Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов. М., 1984. 520 с.
11. Шамис М. А. Встроенные средства контроля устройства релейной защиты на микроэлектронной элементной базе//Электр. станции. 1986. № 6. С. 64—67.
12. Казанский В. Е. Измерительные преобразователи тока в релейной защите. М., 1988. 240 с.
13. Андреев В. А., Фабрикант В. Л. Релейная защита распределительных электрических сетей: Учеб. для вузов. М., 1965. 484 с.
14. Ульянов С. А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: Учеб. для вузов. М., 1970. 519 с.
15. Фабрикант В. Л., Глухов В. П., Паперно Л. Б. Элементы устройств релейной защиты и автоматики энергосистем и их проектирование. М., 1982. 472 с.
16. Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. М., 1987. 368 с.
17. Электромеханические аппараты автоматики: Учеб. для вузов/Б. К. Буль, О. Б. Буль, В. А. Азанов, В. И. Шоффа. М., 1988. 303 с.
18. Клецьель М. Я., Мусин В. В. О построении на герконах защит высоковольтных установок без трансформаторов тока//Электротехника. 1987, № 4. С. 11—13.
19. Федосеев А. М. Релейная защита электрических систем: Учеб. для вузов. 1976. 559 с.
20. Ванин В. К., Павлов Г. М. Релейная защита на элементах аналоговой вычислительной техники. Л., 1983. 207 с.
21. Андреев В. А. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах энергоснабжения: Учеб. для вузов. М., 1985. 391 с.
22. Екин А. С., Марулин Ю. М. Устройство защиты промышленных сетей низкого напряжения от коротких замыканий//Изв. вузов. Электромеханика, 1984. № 11. С. 104—106.

23. *Кудряцев А. А., Кузнецов А. П., Григорьев М. Н.* Максимальная токовая защита с магнитными трансформаторами тока. М., 1981. 56 с.
24. *Паперно Л. Б.* Бесконтактные токовые защиты электроустановок. М., 1983. 110 с.
25. Статическое реле направления мощности серии РМ/Ю. Я. Лямец, Г. С. Нудельман, В. М. Шевцов и др.//Электр. станции. 1982. № 5. С. 63—66.
26. *Фигурнов Е. П.* Релейная защита устройств электроснабжения железных дорог. М., 1981. 215 с.
27. *Федоров Э. К., Шнеерсон Э. М.* Измерительные органы дистанционных защит на основе операционных усилителей//Электричество. 1980. № 2. С. 8—15.
28. *Шнеерсон Э. М.* Дистанционные защиты. М., 1986. 447 с.
29. *Федоров Э. К., Шнеерсон Э. М.* Новые блоки для комплектного устройства защиты//Электр. станции. 1988. № 6. С. 74—77.
30. *Дмитренко А. М.* Дифференциальная защита трансформаторов и автотрансформаторов//Электричество. 1975. № 2. С. 1—9.
31. *Дмитренко А. М.* Об использовании пауз для отстройки дифференциальных защит от переходных токов небаланса//Электричество. 1979. № 1. С. 55—58.
32. *Дмитренко А. М.* Реле дифференциальной защиты высоковольтных электродвигателей и понижающих трансформаторов//Электр. станции. 1983. № 12. С. 56—59.
33. А. с. 890478 СССР, МКИ³ Н 01 Н 87/00; Н 01 Н 85/12. Жидкометаллический предохранитель/В. А. Андреев, Е. В. Бондаренко, Ю. С. Крежевский и др. (СССР). № 2889641/23—07; Заявл. 06.03.80; Опубл. 15.12.81, Бюл. № 46.
34. А. с. 902100 СССР, МКИ³ Н 01 Н 87/00; Н 01 Н 85/12. Жидкометаллический предохранитель/В. А. Андреев, Е. В. Бондаренко, Ю. С. Крежевский, А. В. Кузнецов (СССР). № 2914675/24—07; Заявл. 22.04.80; Опубл. 30.01.82, Бюл. № 4.
35. *Намигозов К. К., Ильина Н. А., Шкловский И. Г.* Аппараты для защиты полупроводниковых устройств. М., 1988. 279 с.
36. О целесообразности применения управляемых предохранителей/В. Л. Фабрикант, В. А. Андреев, Я. Ф. Кузьмин и др.//Электричество. 1968. № 8. С. 66—69.
37. *Гринин Ф. Н., Зотов А. Я., Андреев В. А.* Опыт эксплуатации управляемых предохранителей УПСН-35//Электр. станции. 1972. № 6. С. 69—71.
38. *Андреев В. А., Зотов А. Я., Федоров А. П.* Управляемый предохранитель УПСН-35 и экономическая эффективность его применения//Электричество. 1973. № 5. С. 86—88.
39. Новые плавкие вставки для высоковольтных выхлопных предохранителей/И. У. Никоненко, А. Я. Зотов, Ю. А. Фоминых, А. В. Скурихин//Электр. станции. 1987. № 7. С. 44—47.
40. *Никоненко И. У., Жуков Л. И.* Предохранитель выхлопной напряжением 110 кВ типа ПС-110у1//Электр. станции. 1980. № 3. С. 49—53.
41. А. с. 266887 СССР, МКИ³ Н 01 Н 33/76. Высоковольтный автогазовый выключатель/В. А. Андреев, А. Я. Зотов (СССР).— № 12148595/24—7; Заявл. 11.06.68; Опубл. 1.04.70, Бюл. № 12.
42. *Зотов А. Я.* Автогазовый выключатель на 35 кВ типа УПС-35у1 для защиты понижающих трансформаторов//Электр. станции. 1977. № 5. С. 47—50.
43. А. с. 714537 СССР, МКИ³ Н 01 Н 85/36. Предохранитель — выключатель/В. А. Андреев, А. В. Кузнецов (СССР).— № 2597783/24—07; Заявл. 03.04.78; Опубл. 5.02.80, Бюл. № 5.
44. А. с. 588577 СССР, МКИ³ Н 01 Н 85/02. Высоковольтный предохранитель/В. А. Андреев, Н. Р. Лавшкин, А. В. Бульчев, Е. В. Бондаренко (СССР).— № 2081130/24/07; Заявл. 03.12.74; Опубл. 15.01.78, Бюл. № 2.
45. *Андреев В. А., Лаушкин Н. Р.* Управляемый кварцевый предохранитель и его применение//Электр. станции. 1975. № 7. С. 49—51,

46. А. с. 355687 СССР, МКИ³ Н 01 Н 33/76. Высоковольтный автогазовый выключатель/А. Я. Зотов, А. Л. Плиско (СССР).— № 1614933/24—7; Заявл. 25.01.71; Опубл. 16.10.72, Бюл. № 31.
47. Андреев В. А., Енин А. С. К вопросу совершенствования управляемых предохранителей типа УПСН//Изв. вузов. Энергетика. 1979. № 4. С. 37—40.
48. Андреев В. А. Состояние, использование и пути совершенствования плавких предохранителей как устройств защиты//Релейная защита и автоматика электрических систем. Рига, 1988. С. 58—76.
49. Turner H. W., Turner C. Japan Chases Exports and the Permanent Füsse// Electrical Times. 1977. N 4435 (12), July 15.
50. Дзежбицки С., Вальчук Е. Токоограничивающие выключатели переменного тока. Л., 1982. 115 с.
51. Андреев В. А., Крежевский Ю. С., Кузнецов А. В. О выборе материала диэлектрической втулки (камеры гашения) и жидкого металла для жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей//Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 11. С. 84—89.
52. Андреев В. А., Кузнецов А. В. Основные проблемы создания жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей и возможная область их применения//Изв. вузов. Энергетика. 1987. № 6. С. 42—44.
53. А. с. 884003 СССР, МКИ³ Н 01 Н 87/00; Н 01 Н 85/12. Жидкометаллический предохранитель/В. А. Андреев, Е. В. Бондаренко, Ю. С. Крежевский (СССР).— № 2895665/24-07; Заяв. 18.03.80; Опубл. 23.11.81, Бюл. № 43.
54. А. с. 951449 СССР, МКИ³ Н 01 Н 29/30. Жидкометаллический самовосстанавливающийся ограничитель тока/А. В. Кузнецов (СССР).— № 3212999/24-07; Заяв. 01.10.80; Опубл. 15.08.82, Бюл. № 30.
55. Шабад М. А. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. Л., 1985. 296 с.
56. Андреев В. А., Бондаренко Е. В. Релейная защита, автоматика и телемеханика в системах электроснабжения: Учеб. для вузов. М., 1975. 375 с.
57. Беркович М. А., Комаров А. Н., Семенов В. А. Основы автоматики энергосистем. М., 1981. 433 с.
58. Андреев В. А., Марулин Ю. М. Быстродействующая защита сельских линий напряжением 10 кВ//Изв. вузов. Энергетика. 1981. № 7. С. 16—20.
59. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 12. Токовая защита нулевой последовательности от замыканий на землю линий 110—500 кВ. Расчеты. М., 1980. 88 с.
60. Фабрикант В. Л., Андреев В. А., Бондаренко Е. В. Задачник по релейной защите. М., 1971. 608 с.
61. Руководящие указания по проектированию электроснабжения сельского хозяйства/Всесоюз. гос. проектно-изыскат. и научно-исслед. ин-т. М., 1978.
62. Попов И. Н., Лачугин В. Ф., Соколова Г. В. Релейная защита, основанная на контроле переходных процессов. М., 1986. 248 с.
63. Исследование режимов работы трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6—10 кВ/В. Г. Алексеев, С. Г. Дунайцев, М. Х. Зихерман, В. П. Ильин//Электр. станции. 1980. № 1. С. 56—59.
64. Зихерман М. Х. Повреждение трансформаторов напряжения при дуговых замыканиях на землю в сетях 6—10 кВ//Электр. станции. 1979. № 11. С. 65—67.
65. Желтиков Е. А., Дынкин В. Б., Бунин В. Ш. Об опыте предупреждения повреждений трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях 6—10 кВ//Электр. станции. 1982. № 9. С. 70—71.
66. Андреев В. А., Бондаренко Е. В., Бондаренко Л. С. Контроль изоляции в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью без использования трансформаторов напряжения//Изв. вузов. Энергетика. 1985. № 4. С. 8—13.
67. Федоров Э. К., Шнеерсон Э. М. Дистанционная защита для линий 10—35 кВ//Электр. станции. 1984. № 4. С. 64—67.
68. Гейдерман Ж. П., Стасенко Р. Ф. Выбор уставок защит ДЗ-10//Электр. станции. 1975. № 9. С. 65—68.

69. *Овчаренко Н. И.* Полупроводниковые элементы автоматических устройств энергосистем. М., 1981. 407 с.
70. *Борисов В. А., Орехов Л. А.* Продольные дифференциальные защиты линий с проводными каналами связи. М., 1988. 168 с.
71. *Андреев В. А.* Комбинированная поперечная дифференциальная защита двух параллельных линий//Тр. ин-та энергетики и водного хоз-ва АН КиргССР. 1957. Вып. 4. С. 207—213.
72. *Ракович А. М.* Предотвращение ложных действий дифференциальной поперечной защиты параллельных линий при обрывах проводов//Электр. станции. 1958. № 5. С. 60—62.
73. *Андреев В. А.* Схемы поперечной дифференциальной защиты двух параллельных линий, обладающей селективностью при сложных повреждениях с обрывами//Изв. вузов. Энергетика. 1958. № 5. С. 1—10.
74. *Андреев В. А.* Балансная токовая защита трех параллельных линий//Электричество. 1958. № 1. С. 39—44.
75. *Голубев М. Л.* Автоматическое повторное включение в распределительных сетях. М., 1982. 91 с.
76. О допустимых кратностях токов при несинхронном АПВ для генераторов, синхронных конденсаторов и трансформаторов: Эксплуатационный циркуляр Э-9/61 от 22 июля 1961//Электр. станции. 1961. № 11. С. 94—96.
77. Автоматика электроэнергетических систем: Учеб. пособие для вузов/О. П. Алексеев, В. Е. Казанский, В. Л. Козис и др.; Под ред. В. Л. Козиса и Н. И. Овчаренко. М., 1981. 479 с.
78. *Рабинович Р. С.* Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. М., 1980. 344 с.
79. *Шабад М. А.* Автоматика электрических сетей 6—35 кВ в сельской местности. Л., 1979. 104 с.
80. *Андреевский Е. Н.* Секционирование и резервирование сельских электросетей. М., 1983. 112 с.
81. *Якобс А. И., Липантьева Н. И.* Электробезопасность в сельском хозяйстве//Механизация и электрификация соц. сел. хоз-ва. 1975. № 5. С. 27—29.
82. Аналитический метод выбора открытых плавких вставок/В. А. Андреев, Ф. Н. Гринин, А. Я. Зотов, А. П. Федоров//Тр. Ульян. политехн. ин-та. 1972. Т. 18, вып. 1: Электрооборудование и автоматизация пром. установок. С. 13—21.
83. *Беляев А. В.* Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ. Л., 1988. 173 с.
84. Рекомендации по обеспечению селективности защиты в сетях напряжением до 1000 В переменного тока.— М.: ЦБНТИ, 1980.
85. *Херсонский А. С., Левин А. Ш., Фексон Я. М.* Селективная защита от однофазных коротких замыканий ФО—0,4 для распределительных электросетей 0,4 кВ//Электр. станции 1975. № 3. С. 47—48.
86. *Сошников А. А.* Защита сельских воздушных линий 0,38 кВ//Техника в сел. хоз-ве. 1977. № 10.
87. *Сагудинов Р. Ш., Красников В. И., Головацкий В. Г.* Защита электрических сетей 0,38 кВ при обрыве проводов//Электр. станции. 1982. № 7. С. 56—58.
88. *Селивахин А. И., Кобазев В. П., Желиховский Х. М.* Защита воздушной линии электропередачи 0,38 кВ от обрыва фазного провода //Механизация и электрификация сел. хоз-ва. 1985. № 7. С. 55—57.
89. *Тудоровский Я. Л.* К вопросу о сопротивлении нулевой последовательности ВЛ 0,4 кВ//Пром. энергетика. 1988. № 1. С. 36—39.
90. *Андреев В. А., Шишкин В. Ф., Дубов А. Л.* По поводу статьи «К вопросу о сопротивлении нулевой последовательности ВЛ 0,4 кВ»//Пром. энергетика. 1989. № 7. С. 52—54.
91. *Андреев В. А., Шишкин В. Ф., Дубов А. Л.* О влиянии заземляющих устройств нулевого провода на распределение токов нулевой последовательности сельских воздушных линий 0,38 кВ//Электричество. 1989. № 12,

92. А. с. 1417097 СССР, МКИ³ Н 02 Н 5/10. Устройство для защиты линии электропередачи/В. А. Андреев, И. О. Карпов, А. Л. Дубов, А. Л. Буймистер (СССР).— № 4181207/24-07; Заявл. 12.01.87; Опубл. 15.08.88, Бюл. № 30.
93. *Тубис И. Р.* Релейная защита мощных турбогенераторов.— М.: Энергоиздат, 1981. с.
94. *Семенов В. А.* О возможности повышения чувствительности продольной дифференциальной защиты генераторов//Электр. станции. 1958. № 6. С. 59.
95. *Сирота М. И.* Защита генераторов от двойных замыканий на землю// Электр. станции. 1959. № 3. С. 64—68.
96. Руководящие указания по релейной защите. Вып. 1. Защита генераторов, работающих на сборные шины. М., 1961. 68 с.
97. *Шабад М. А.* Защита генераторов малой и средней мощности. М., 1973. 95 с.
98. *Веников В. А.* Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М., 1978. 415 с.
99. *Панфилов Н. И., Сиротинский Е. Л.* Повышение качества точной синхронизации генераторов//Электричество. 1981. № 1. С. 17—21.
100. *Вострокрутов Н. Н., Сиротинский Е. Л.* Новый принцип получения постоянного времени опережения в автоматических синхронизаторах//Электричество. 1961. № 8. С. 35—40.
101. *Бояришна А. Е.* Устройство точной синхронизации УТЭС: Техническое описание и инструкция ИЖТП 467871.001Т0/ВНИИЭлектропривод. М., 1988.
102. *Соловьев И. И.* Автоматические регуляторы синхронных генераторов/ Под ред. Н. И. Овчаренко. М., 1981. 247 с.
103. *Баркан Я. Д., Орехов Л. А.* Автоматизация энергосистем: Учеб. пособие для вузов. М., 1981. 271 с.
104. *Воробей В. К., Федоров В. Ф.* Пути развития бесщеточных систем возбуждения мощных турбогенераторов//Электротехника. 1986. № 1. С. 16—19.
105. Автоматический регулятор возбуждения АРВ-СДП1: Техническое описание: (05С.466.590Т0)/орг. М., 1983.
106. *Гаген А. Ф., Комиссаров Г. А., Чечушков Г. А.* Защита трансформаторов от витковых замыканий//Электричество. 1974. № 2. С. 56—59.
107. *Розенкрон Я. К., Рейнвальд О. А., Рорбах А. А.* Замкнутые электрические сети г. Риги, М., 1972. 54 с.
108. *Солдаткина Л. А.* Электроснабжение в крупных городах США. М. — Л., 1957.
109. *Айзенберг Б. Л., Козлов В. А.* Электрические сети зарубежных городов. М. — Л., 1958.
110. *Фаерман А. Л.* О результатах испытаний реле РОМ-3 для замкнутых электрических сетей напряжением до 1000 В//Электр. станции. 1969. № 12. С. 87.
111. *Розенкрон Я. К.* О релейной защите замкнутых городских электрических сетей//Электр. станции. 1981. № 11. С. 63—68.
112. Новые устройства релейной защиты и автоматики энергосистем: Тез. докл. Рига, ЛатНИИНТИ, 1980. 89 с.
113. *Булитко А. Д., Дерюгин Ф. Ф.* Открытые плавкие вставки на стороне высшего напряжения понизительных подстанций//Электр. станции 1960. № 1. С. 47—51.
114. *Зотов А. Я., Фоминых Ю. А.* Перегрузочная способность управляемого предохранителя типа УПС-35У1//Электр. станции. 1982. № 6. С. 49—53.
115. *Зотов А. Я., Дедешин П. П.* Анализ работы подстанций 35/6 — 10 кВ, оснащенных предохранителями//Электр. станции. 1981. № 3. С. 40—45.
116. Справочник по проектированию электроснабжения/Под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. М., 1980. 456 с.
117. *Голубев М. Л.* Расчет уставок релейной защиты и предохранителей в сетях 0,4 — 35 кВ. М., 1969. 134 с.
118. Выбор и опыт эксплуатации плавких вставок новой конструкции для предохранителей ПСН-35/В. А. Андреев, Ф. Н. Гринин, А. Я. Зотов, А. П. Фе-

- доров//Электр. станции. 1973. № 4. С. 87—88.
119. *Андреев В. А.* Выбор плавких вставок стреляющих предохранителей и определение области их применения в качестве защиты трансформаторов//Изв. вузов. Энергетика. 1984. № 3. С. 16—21.
120. *Андреев В. А., Булычев А. В., Крежевский Ю. С.* Об улучшении характеристик предохранителей для защиты маломощных трансформаторов//Электр. станции. 1975. № 2. С. 62—63.
121. *Линдорф Л. С., Слодарж М. И.* О допустимости несинхронного включения синхронных двигателей//Пром. энергетика. 1971. № 10. С. 43—47.
122. *Мичурин О. И., Фишман В. С.* Повышение эффективности работы АВР//Пром. энергетика. 1979. № 1. С. 20—22.
123. *Сивокобыленко В. Ф., Гребченко Н. В.* Пусковой орган быстродействующего АВР//Пром. энергетика. 1982. № 10. С. 21—23.
124. *Баркан Я. Д., Бринкис К. А.* Автоматизация регулирования напряжения на трансформаторах//Электр. станции. 1960. № 11. С. 59—64.
125. Бесконтактные автоматические регуляторы напряжения для трансформаторов с регулированием под нагрузкой/Е. Л. Сиротинский, М. Г. Рожков, Н. Н. Вострокрутов, Н. И. Панфилов//Электричество, 1963. № 7. С. 4—12.
126. *Карпов Ф. Ф., Солдаткина Л. А.* Регулирование напряжения в электросетях промышленных предприятий. М., 1970. 223 с.
127. *Андреев В. А., Долгов А. А., Енин А. С.* Пути совершенствования системы телеотключения упрощенных подстанций//Изв. вузов. Электромеханика. 1984. № 5. С. 112—114.
128. *Андреев В. А., Плиско А. Л.* Области применения различных модификаций управляемых предохранителей на подстанциях упрощенного типа//Изв. вузов. Энергетика. 1982. № 7. С. 86—88.
129. *Кожин А. Н., Рубинчик В. А.* Релейная защита линий с ответвлениями. М., 1967. 262 с.
130. *Корогодский В. И., Дударев Л. Е.* Оценка защит от замыканий на землю двигателей высокого напряжения//Пром. энергетика. 1984. № 1. С. 17—19.
131. *Галкин В. Д.* Об использовании фазового сдвига токов для реализации защит асинхронных двигателей напряжением ниже 1000 В//Пром. энергетика. 1980. № 7. С. 32—35.
132. *Коваленский И. В.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1000 В. М., 1977. 105 с.
133. *Трунковский Л. Е.* Контроль обрыва фаз//Пром. энергетика. 1983. № 7. С. 23.
134. *Ерошенко Г. П.* О комплексной защите электродвигателей//Пром. энергетика. 1981. № 7. С. 21—23.
135. *Кропачев И. Г.* Устройство защиты электродвигателя от обрыва фазы и перегрузки//Пром. энергетика. 1979. № 9. С. 30—33.
136. *Зинченко В. Ф., Будовский В. П.* Комбинированная защита двигателя напряжением ниже 1000 В//Пром. энергетика. 1981. № 10. С. 30—32.
137. *Тубис Я. Б., Белов Г. И.* Температурная защита асинхронных двигателей в сельскохозяйственном производстве. М., 1977. с.
138. *Корогодский В. И., Кужеков С. Л., Паперно Л. Б.* Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ. М., 1987. 248 с.
139. Многофункциональное устройство защиты электродвигателей выше 1 кВ/С. Л. Кужеков, Е. П. Варфоломеев, С. П. Баранов, А. Г. Пантелеев//Пром. энергетика. 1988. № 10. С. 39—41.
140. Справочник по проектированию электроснабжения линий электропередачи и сетей/Под ред. Я. М. Большама, В. И. Круповича, М. Л. Самовера. М., 1974. 695 с.
141. *Надель Л. А.* Защита электродвигателей при перегрузках с зависимой от тока выдержкой времени//Электротехн. пром-сть. Сер. Аппараты низкого напряжения. 1982. № 4. С. 13—16.
142. *Вайнгер А. М., Янко-Триницкий А. А., Подобедов В. Г.* Новые схемы

защит от асинхронного хода для синхронных двигателей, работающих в режиме резкопеременных нагрузок//Пром. энергетика. 1976. № 7. С. 40—44.

143. *Сивокобыленко В. Ф., Левшов А. В.* Защита синхронных электродвигателей от асинхронного режима//Электр. станции. 1989. № 2. С. 75—80.

144. *Абрамович Б. Н., Круглый А. А.* Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей. Л., 1983. 128 с.

145. *Кропачев И. Г.* Защитные устройства асинхронных двигателей малой мощности//Пром. энергетика. 1980. № 10. С. 27—32.

146. *Зимин Е. Н.* Защита асинхронных двигателей до 500 В. М.—Л., 1967. 88 с.

147. *Пряхин В. Я.* Устройство защиты электродвигателей от повреждений//Пром. энергетика. 1988. № 7. С. 21—22.

148. *Андреев В. А., Бондаренко Е. В., Плиско А. Л.* По поводу статьи «Устройство защиты электродвигателей от повреждений»//Пром. энергетика. 1989. № 2. С. 55—56.

149. *Зейбот В. В., Груднулис А. О.* Фазочувствительное полупроводниковое устройство защиты электродвигателей напряжением до 1000 В//Пром. энергетика. 1980. № 8. С. 31—32.

150. *Андреев В. А., Крежевский Ю. С., Кузнецов А. В.* Повышение надежности систем электроснабжения путем применения самовосстанавливающихся предохранителей//Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий: Тез. докл. Всесоюз. научн. семинара. Жданов, 1983. С. 236—238.

151. *Андреев В. А., Кузнецов А. В.* О повышении надежности и экономичности систем электроснабжения до 1000 В с тиристорными аппаратами управления путем применения жидкометаллических предохранителей//Состояние и перспективы развития электротехнологии: Вторые Бенардосовские чтения: Тез. докл. науч.-техн. конф. Иваново, 1985. С. 66—67.

152. А. с. 1192023 СССР, МКИ³ Н 02 Н 7/10. Устройство защиты тиристор-В. А. Андреев, Е. В. Бондаренко, Ю. С. Крежевский, А. В. Кузнецов (СССР). № 3676176/24-07; Заявл. 17.10.83; Оpubл. 15.11.85. Бюл. № 42.

153. *Андреев В. А., Кузнецов А. В.* Устройство защиты на основе жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей: Информ. л. № 87—30/Ульян. ЦНТИ. Ульяновск, 1987. 4 с.

154. *Шабад М. А.* Релейная защита и автоматика на электроподстанциях, питающих синхронные двигатели. Л., 1984. 64 с.

155. *Мельников А. Я.* Опыт эксплуатации схемы автоматического управления конденсаторными батареями//Пром. энергетика. 1987. № 3. С. 13.

156. *Андреев В. А., Бондаренко Е. В.* По поводу статьи «Опыт эксплуатации схемы автоматического управления конденсаторными батареями»//Пром. энергетика. 1988. № 1. С. 49—50.

157. *Пивоваров В. И.* Автоматический регулятор мощности конденсаторной батареи//Пром. энергетика. 1982. № 7. С. 59—60.

158. *Костенко С. И., Липлянский Б. И.* Устройство для автоматического регулирования мощности конденсаторных батарей//Пром. энергетика. 1985. № 3. С. 36—38.

159. *Сурвило И. К.* Автоматический регулятор конденсаторных батарей АРКОН-1//Пром. энергетика. 1975. № 7. С. 12—13.

160. *Метелица Я. В., Павликов С. А., Чечушков Г. А.* Релейная защита питающего трансформатора и сети низкого напряжения электропечной установки графитации//Пром. энергетика. 1984. № 7. С. 32—33.

161. *Свенчанский А. Д., Трейзон Э. Л., Мнухин Л. А.* Электроснабжение и автоматизация электротермических установок. М., 1980. 319 с.

162. *Лежнев А. П., Зайцев В. В.* Усовершенствование регулятора мощности дуговой электропечи//Пром. энергетика. 1982. № 4. С. 18—20.

163. *Байтер И. И., Богданова Н. А.* Защита шин 6—10 кВ. М., 1984. 89 с.

Предисловие	3
Введение	6
§ В.1. Основные элементы, общность и различие систем электроснабжения ведущих отраслей народного хозяйства	6
§ В.2. Назначение релейной защиты и автоматики в системах электроснабжения	12
§ В.3. Элементы и функциональные части устройств релейной защиты и автоматики	16
§ В.4. Функции релейной защиты и автоматики и основные требования, предъявляемые к этим устройствам	21
§ В.5. Основные принципы действия релейной защиты и автоматики	26

РАЗДЕЛ I

ЭЛЕМЕНТЫ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Глава 1. Линейные и нелинейные измерительные преобразователи синусоидальных напряжений и токов	35
§ 1.1. Первичные измерительные преобразователи тока	35
§ 1.2. Первичные измерительные преобразователи напряжения	40
§ 1.3. Реакторы и трансреакторы	44
§ 1.4. Магнитные усилители	46
§ 1.5. Насыщающиеся трансформаторы тока	48
§ 1.6. Фазоповоротные и частотно-зависимые схемы	50
§ 1.7. Фильтры симметричных составляющих тока и напряжения	52
§ 1.8. Нелинейные измерительные преобразователи	59
Глава 2. Электромеханические элементы	64
§ 2.1. Общие сведения об электромеханических системах	64
§ 2.2. Принцип действия и выполнение электромагнитных реле	65
§ 2.3. Электромагнитные измерительные реле	70
§ 2.4. Электромагнитные логические реле	78
§ 2.5. Принцип действия и выполнение индукционных реле	84
§ 2.6. Индукционные измерительные реле	86
§ 2.7. Электромеханические реле с постоянным магнитом	93
Глава 3. Полупроводниковые и микроэлектронные элементы	95
§ 3.1. Некоторые сведения о полупроводниковой и микроэлектронной элементной базе	95
§ 3.2. Полупроводниковые и микроэлектронные элементы логических органов	98
§ 3.3. Полупроводниковые и микроэлектронные элементы измерительных органов	105
§ 3.4. Полупроводниковые измерительные реле с одной воздействующей электрической величиной	113
§ 3.5. Полупроводниковые измерительные реле с двумя воздействующими электрическими величинами	123
§ 3.6. Микропроцессорная элементная база	138

Глава 4. Электротепловые элементы	141
§ 4.1. Характеристики плавких предохранителей, электротепловых и температурных реле	141
§ 4.2. Конструкции плавких предохранителей, электротепловых и температурных реле	145
§ 4.3. Управляемые предохранители	149
§ 4.4. Жидкометаллические самовосстанавливающиеся предохранители	153

РАЗДЕЛ 2

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Глава 5. Токовые защиты	157
§ 5.1. Основные органы токовых защит	157
§ 5.2. Схемы соединения измерительных преобразователей тока и цепей тока вторичных измерительных органов	158
§ 5.3. Первая ступень токовой защиты—токовая отсечка без выдержки времени	164
§ 5.4. Вторая ступень токовой защиты—токовая отсечка с выдержкой времени	167
§ 5.5. Третья ступень токовой защиты—максимальная токовая защита	169
§ 5.6. Совместное действие токовой защиты и устройств автоматического повторного включения и автоматического включения резерва	174
§ 5.7. Схемы и общая оценка токовых защит	177
§ 5.8. Токовая защита с измерительными органами тока и напряжения	183
§ 5.9. Токовая защита с выдержкой времени, зависимой от третьей гармонической тока	185
§ 5.10. Токовые защиты, реагирующие на скорость нарастания или абсолютное приращение тока	187
§ 5.11. Токовые защиты нулевой последовательности сетей с глухозаземленными нейтральями	188
Глава 6. Токовые направленные защиты	192
§ 6.1. Принцип действия, основные органы и выбор параметров токовой направленной защиты и токовой направленной защиты нулевой последовательности	192
§ 6.2. Схемы включения реле направления мощности	199
§ 6.3. Схемы и общая оценка токовых направленных защит и токовых направленных защит нулевой последовательности	204
Глава 7. Защиты от замыкания на землю в сетях с изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы нейтральями	207
§ 7.1. Установившийся режим однофазного замыкания на землю в сетях с изолированными нейтральями	207
§ 7.2. Защиты от замыкания на землю, реагирующие на токи и напряжения нулевой последовательности установившегося режима	212
§ 7.3. Направленная защита нулевой последовательности, реагирующая на установившиеся токи и напряжения	214
§ 7.4. Токовая защита, реагирующая на высшие гармонические в установившемся токе нулевой последовательности	217
§ 7.5. Защиты, основанные на контроле тока и начального знака мгновенной мощности нулевой последовательности переходного процесса	219
§ 7.6. Защита трансформаторов напряжения контроля изоляции в сетях с изолированной нейтралью	222

	стр.
§ 7.7. Устройство контроля изоляции в сетях с изолированными нейтральными без использования трансформаторов напряжения	226
Глава 8. Дистанционные защиты	230
§ 8.1. Назначение, принцип действия и основные органы защиты	230
§ 8.2. Выбор входных воздействующих величин дистанционных органов	233
§ 8.3. Схемы дистанционных защит	236
§ 8.4. Выбор параметров срабатывания дистанционной защиты	239
Глава 9. Дифференциальные токовые защиты	243
§ 9.1. Назначение и виды дифференциальных защит	243
§ 9.2. Принцип действия продольной дифференциальной токовой защиты	243
§ 9.3. Ток небаланса и ток срабатывания дифференциальной защиты с циркулирующими токами	245
§ 9.4. Способы повышения чувствительности дифференциальной защиты	247
§ 9.5. Продольная дифференциальная защита линий и ее особенности	250
§ 9.6. Поперечная дифференциальная токовая защита	253
§ 9.7. Поперечная дифференциальная токовая направленная защита	255
§ 9.8. Пусковые органы поперечной дифференциальной токовой направленной защиты	258
§ 9.9. Выполнение и область использования поперечных дифференциальных токовых направленных защит	262
§ 9.10. Балансная защита	264
Глава 10. Устройства автоматики систем электроснабжения	266
§ 10.1. Назначение устройств автоматического повторного включения, требования к ним и расчет их параметров	266
§ 10.2. Схемы устройств автоматического повторного включения	268
§ 10.3. Особенности устройств автоматического повторного включения линий с двусторонним питанием	272
§ 10.4. Устройства трехфазного автоматического повторного включения без контроля синхронизма линий с двусторонним питанием	273
§ 10.5. Устройства трехфазного автоматического повторного включения с контролем синхронизма линий с двусторонним питанием	277
§ 10.6. Требования к устройству АВР, принципы их выполнения и расчет параметров	280
§ 10.7. Схемы устройств автоматического включения резерва	285
§ 10.8. Требования, принципы выполнения и выбор параметров устройств автоматической частотной разгрузки	287
§ 10.9. Схемы устройств автоматической частотной разгрузки и частотного автоматического повторного включения	290
§ 10.10. Устройства автоматики деления	292
§ 10.11. Согласование действия устройств АВР, АПВ, АЧР и АД	293
§ 10.12. Устройства системной противоаварийной автоматики	297
Глава 11. Защита и автоматика электрических сетей напряжением до 1 кВ	300
§ 11.1. Виды повреждений, назначение и выполнение защиты сетей напряжением до 1 кВ	300
§ 11.2. Защита плавкими предохранителями	301

	стр.
§ П.3. Чувствительность и селективность плавких предохранителей	304
§ 11.4. Автоматические воздушные выключатели и их устройства защиты (расцепители)	308
§ 11.5. Выбор параметров расцепителей автоматических выключателей	311
§ 11.6. Чувствительность и селективность расцепителей автоматических выключателей	314
§ 11.7. Защита от однофазных повреждений в четырехпроводной сети с глухозаземленной нейтралью и пути ее совершенствования	316
§ 11.8. Устройства защитного отключения	321
§ 11.9. Комбинированное устройство защиты и управляемого предохранителя	325
§ 11.10. Устройства автоматического включения резерва в сетях напряжением до 1 кВ	326

РАЗДЕЛ 3

ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕМЕНТОВ СТАНЦИЙ, ПОДСТАНЦИЙ И ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Глава 12. Защита и автоматика синхронных генераторов	330
§ 12.1. Повреждения и ненормальные режимы работы синхронных генераторов, устройства защиты и автоматики	330
§ 12.2. Защита от многофазных коротких замыканий в обмотке статора генератора напряжением выше 1 кВ	333
§ 12.3. Защита от однофазных повреждений в обмотке статора генератора напряжением выше 1 кВ	337
§ 12.4. Устройства защиты генератора напряжением выше 1 кВ от ненормальных режимов работы	340
§ 12.5. Защита генератора напряжением выше 1 кВ от замыканий на землю в цепи возбуждения	344
§ 12.6. Защита генераторов напряжением до 1 кВ	346
§ 12.7. Синхронизация генераторов	348
§ 12.8. Системы возбуждения синхронных генераторов и назначение устройств автоматического регулирования возбуждения	357
§ 12.9. Устройства АРВ пропорционального действия синхронных генераторов с электромашинным возбудителем постоянного тока	361
§ 12.10. Устройство АРВ сильного действия АРВ — СДП синхронных генераторов с тиристорной системой возбуждения	367
§ 12.11. Регулирование напряжения и реактивной мощности в системах электроснабжения устройствами автоматического регулирования возбуждения	370
Глава 13. Защита и автоматика трансформаторов	372
§ 13.1. Виды повреждений и ненормальных режимов работы трансформаторов	372
§ 13.2. Газовая защита	374
§ 13.3. Токовые и токовые направленные защиты трансформатора от коротких замыканий	376
§ 13.4. Дифференциальные токовые защиты трансформаторов и особенности их выполнения	381
§ 13.5. Схемы, выбор параметров и область использования дифференциальных защит трансформаторов	386
§ 13.6. Токовые защиты трансформатора от сверхтоков внешних коротких замыканий и перегрузок	394
§ 13.7. Защита трансформатора открытыми плавкими вставками и	

	плавкими предохранителями	стр. 399
	§ 13.8. Защита трансформаторов управляемыми предохранителями	406
	§ 13.9. Устройства противоаварийной автоматики трансформаторов	407
	§ 13.10. Автоматические устройства управления режимами работы трансформаторов	411
Глава 14.	Защита и автоматика подстанций без выключателей на стороне высшего напряжения и линий с ответвлениями	418
	§ 14.1. Общие сведения	418
	§ 14.2. Защита и автоматика подстанций без выключателей на стороне высшего напряжений	419
	§ 14.3. Особенности релейной защиты и автоматики линий с ответвлениями	427
Глава 15.	Защита и автоматика электродвигателей	431
	§ 15.1. Виды повреждений и ненормальных режимов работы электродвигателей и требования к их защитам	431
	§ 15.2. Защита и автоматика асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ	436
	§ 15.3. Защита и автоматика синхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ	443
	§ 15.4. Особенности защиты и автоматики синхронных компенсаторов	449
	§ 15.5. Защита и автоматика электродвигателей напряжением до 1 кВ	450
	§ 15.6. Защита электродвигателей напряжением до 1 кВ с использованием жидкометаллических самовосстанавливающихся предохранителей	460
	§ 15.7. Влияние синхронных электродвигателей на выбор параметров устройств релейной защиты и автоматики элементов системы электроснабжения	463
Глава 16.	Защита и автоматика специальных электроустановок	468
	§ 16.1. Специальные электроустановки систем электроснабжения	468
	§ 16.2. Защита и автоматика конденсаторных установок	468
	§ 16.3. Особенности защиты и автоматики трансформаторов электропечных установок	473
	§ 16.4. Особенности защиты и автоматики полупроводниковых преобразовательных агрегатов	476
	§ 16.5. Защита и автоматика шин	479
Список	литературы	485

Учебное издание

Андреев Василий Андреевич

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Зав. редакцией *Н. И. Хрусталева*. Редактор *В. И. Милешин*. Младший редактор *Г. Г. Бучина*. Художественный редактор *Т. М. Скворцова*. Технический редактор *Л. Ф. Попова*.
Корректор *Г. И. Кострикова*.

ИБ № 8807

Изд. № СТД-720. Сдано в набор 23.01.91. Подп. в печать 17.09.91. Формат 60×88¹/₁₆. Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Объем 30,38 усл. п. л. + 0,25 усл. п. л. форз. 30,87 усл. кр.-отт. 35,70 уч.-изд. л. + 0,34 уч.-изд. л., форз. Тираж 22 000 экз.

Заказ № 821. Цена 2 р. 20 к.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Московская типография № 8 при Госкомпечати СССР, 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7.