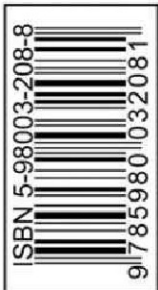


Находка для специалиста!

Библиотека Инженера

Дубинский Г. Н., Левин Л. Г.

Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 вольт



Силовые трансформаторы

Распределительные устройства

Устройства релейной защиты и автоматики

Теория и практика для специалиста-наладчика

Секреты наладки и ремонта

Основные руководящие документы

Справочная информация



Серия «Библиотека инженера»

Г. Н. Дубинский, Л. Г. Левин

**НАЛАДКА УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЕМ СВЫШЕ 1000 ВОЛЬТ**

**Москва
СОЛОН-ПРЕСС
2009**

УДК 621.399
ББК 32.882
Д93

Г. Н. Дубинский, Л. Г. Левин

Д93 Наладка устройств электроснабжения напряжением свыше 1000 вольт. — М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2009. — 416 с.: ил. — (Серия «Библиотека инженера»).

ISBN 5-98003-208-8

В книге изложены основные сведения по методике приемо-сдаточных испытаний устройств электроснабжения напряжением до 110 кВ. Объем и нормы испытаний электрооборудования даны в соответствии с «Правилами устройства электроустановок» и другими директивными документами. Описаны типовые схемы и элементы релейной защиты и автоматики, их проверка и испытание.

Предназначается для специалистов пусконаладочных организаций и служб эксплуатации, занимающихся практической работой в области испытаний и измерений параметров электрооборудования и аппаратов на подстанциях и в распределительных устройствах напряжением выше 1000 В. Пособие будет полезным подспорьем и для работников сельской электрификации.

Книга может быть использована как учебное пособие в средних специальных учебных заведениях соответствующего профиля.

УДК 621.399
ББК 32.882

КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом (оплата при получении) по фиксированной цене. Заказ оформляется одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20.
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: magazin@coba.ru.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: katalog@coba.ru.

ISBN 5-98003-208-8

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2009
© Г. Н. Дубинский, 2009
© Л. Г. Левин, 2009

Введение

Работы по наладке устройств электроснабжения включают целый комплекс проверок и испытаний, проводимых при вводе электроустановки в действие, а также в целях профилактики и после ремонта. Как правило, в первом случае работы выполняются персоналом подрядных пусконаладочных организаций, во втором — службой эксплуатации. Настоящая книга отражает содержание и методику производства наладочных работ на подстанциях потребителей с силовым электрооборудованием до 110 кВ (преимущественно 6—35 кВ), где выполняется основной физический объем этих работ. Наладочные работы по подстанциям напряжением выше 110 кВ, электростанциям, энергосистемам и системной автоматике производятся специализированными подразделениями энергоснабжающих организаций и здесь не рассматриваются.

Материал по проверке и испытаниям электрооборудования подстанций изложен в строгом соответствии с требованиями главы 1.8 «Нормы приемо-сдаточных испытаний» Правил устройства электроустановок (ПУЭ). Эти Правила, а также Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей являются основными руководящими документами, требования которых подлежат безусловному выполнению. Обязательный характер имеют также инструкции заводов-изготовителей электрооборудования, приборов и аппаратов. При пользовании названными документами необходимо руководствоваться следующим:

1) нормы и требования 6-го издания ПУЭ действительны до даты ввода в действие соответствующих глав 7-го издания, после чего они утрачивают силу;

2) нормы и требования, отличные от ПУЭ, могут выполняться лишь в тех случаях, когда они являются более жесткими, например требования Госэнергонадзора, Госгортехнадзора или владельца подстанции, опыт наладочных организаций и др.;

3) к сожалению, требования ПУЭ и Правил эксплуатации совпадают не полностью. Здесь надо принимать во внимание то обстоятельство, что первые «распространяются на вновь сооружаемые и реконструируемые электроустановки», а вторые — на электроустановки, находящиеся в эксплуатации или ремонте;

4) в настоящее время в России введен ряд стандартов ГОСТ Р, идентичных стандартам Международной Электротехнической Комиссии (МЭК). Следует иметь в виду, что, согласно разъяснению Главгосэнергонадзора, требования ГОСТ Р становятся обязательными для исполнения лишь после утверждения их в составе ПУЭ;

5) если нормы и требования ПУЭ и инструкций фирм-изготовителей не совпадают (например, нормы испытания повышенным напряжением), окон-

чательное решение должны принимать энергоснабжающая организация или владелец электроустановки;

б) близким по значимости и содержанию к указанным государственным руководящим документам является «Объем и нормы испытаний электрооборудования» РАО «ЕЭС России».

Вопросы, регламентируемые ПУЭ, излагаются в 1-м и 2-м разделах настоящей книги, под теми же наименованиями рубрик и в том же порядке. Далее следует описание технологии наладочных работ с необходимыми пояснениями и иллюстрациями; рассматриваются возможные варианты.

В главах, посвященных релейной защите (разделы 3 и 4), использованы материалы рекомендательного и информативного характера: справочники по наладке, паспорта, каталоги и т. п., а также выпущенная в последние годы издательством НЦ ЭНАС серия пособий по техническому обслуживанию релейной защиты и автоматики. Поскольку квалифицированный специалист-наладчик должен владеть не только приемами выполнения работ, но в известной степени и вопросами теории, принципов конструкции и функционирования установленного оборудования, классификации, терминологии, некоторые методические материалы предваряются краткими сведениями из производственных и учебных изданий.

Более подробно приводятся сведения об электрических измерениях, полупроводниковой и вычислительной технике и особенно по схемам и устройствам релейной защиты и автоматики (раздел 3). Такой подход диктуется, по нашему мнению, следующими обстоятельствами. Специальность наладчика достаточно универсальна и требует более или менее глубоких знаний в различных областях электротехники, в то время как учебные программы отдельных вузов всего спектра этих вопросов не содержат; кроме того, идет интенсивное обновление техники. Многие наладчики преодолевают связанные с этим трудности путем самообразования. Однако просмотр значительного количества учебной и специальной литературы различного профиля требует много времени и не всегда возможен, особенно для командированного персонала. Вместе с тем объем книги должен быть не слишком велик, с тем чтобы наладчик мог воспользоваться ею непосредственно на объекте. Разумеется, данное пособие не может и не должно заменить инструкции, учебные пособия и т. п., к которым следует обращаться при необходимости более детального ознакомления с вопросом.

За исключением отдельных замечаний, в книге не освещаются мероприятия по обеспечению безопасности, так как они составляют предмет отдельного курса, правила техники безопасности наладчики изучают постоянно и ежегодно сдают экзамен на квалификационную группу по электробезопасности. Тем не менее надо твердо помнить, что обеспечение безопасности проведения работ имеет приоритетное значение. Рискнем утверждать, что при возникновении альтернативы лучше не выполнить данную работу в установленный срок, чем пренебречь требованиями техники безопасности.

Не приводятся также схемы конкретных электроизмерительных приборов и правила пользования ими, так как эта информация содержится в фирменных документах, а также ввиду чрезвычайного разнообразия современной приборной базы.

Стремление расширить диапазон и глубину излагаемого материала и одновременно ограничить объем книги противоречиво и потребовало компромисса. Насколько это удалось — судить читателям, и авторы будут благодарны тем из них, кто не сочтет за труд прислать свои отзывы и пожелания по адресу:

123242, г. Москва, а/я 20, ООО Издательство «СОЛОН-Пресс»

или

192102, г. Санкт-Петербург, ул. Бухарестская, 6, ООО «Электронладка».

Авторы

Раздел 1

СИЛОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Общие положения

В соответствии с ГОСТом принята единая структура условного обозначения трансформаторов: О — однофазный или Т — трехфазный трансформатор, М — масляный с естественной циркуляцией воздуха и масла, С — сухой, З — защищенное исполнение, Г — герметичное, Н — возможность регулирования под нагрузкой. После буквенной части обозначения через тире указывается номинальная мощность трансформатора в киловольт-амперах (кВ·А), затем через дробь — класс напряжения стороны высшего напряжения (ВН) в киловольтах (кВ) и далее через тире — климатическое исполнение и категория размещения оборудования. Например, условное обозначение ТМ-250/10-УЗ относится к трансформатору масляному, двухобмоточному, мощностью 250 кВ · А, класса напряжения 10 кВ, исполнения У категории З (для умеренного климата и закрытых помещений), обозначение ТСЗ-400/10-УЗ — к трансформатору трехфазному сухому с естественным воздушным охлаждением, защищенного исполнения, мощностью 400 кВ · А. В паспортной табличке приводятся основные параметры трансформатора.

Номинальные напряжения трансформатора. В качестве номинального указывается значение междуфазного (линейного) напряжения. Большинство трансформаторов с ВН 10 кВ выпускается с НН 0,4 кВ для питания электроприемников напряжением 380 и 220 В. В обмотке ВН ряда трансформаторов предусматривается возможность изменения напряжения в диапазоне $\pm 5\%$ номинального ступенями по 2,5 %. Это достигается переключением ответвлений обмотки ВН, обязательно при отключении всех обмоток трансформатора от сети. Такой вид переключения сокращенно обозначается ПБВ (переключение без возбуждения), в отличие от РПН (регулирование под нагрузкой). Устройства типа ПБВ — ручного действия, устройства типа РПН имеют привод с кнопчным (дистанционным и местным) или автоматическим управлением.

Номинальные значения мощности и тока. Мощность трехфазного трансформатора определяется как сумма мощностей всех трех фаз. При равномерной нагрузке фаз полная мощность равна:

$$S = \sqrt{3}UI,$$

где U — линейное напряжение; I — линейный ток.

Из этого выражения по известным значениям мощности и напряжения можно рассчитать соответствующие значения токов обмоток ВН и НН трансформатора. Так, например, для трансформатора мощностью 400 кВ·А с напряжением 10/0,4 кВ номинальные токи обмоток будут:

$$I_{\text{ном.ВН}} = 400 / (1,73 \cdot 10) = 23,1 \text{ А — на стороне ВН};$$

$$I_{\text{ном.НН}} = 400 / (1,73 \cdot 0,4) = 578 \text{ А — на стороне НН}.$$

Как правило, значения рабочих токов не должны превышать номинальные, с тем чтобы в конечном счете избежать перегрева обмоток трансформатора. Однако допускаются кратковременные и длительные перегрузки в определенных пределах, регламентируемых ГОСТом.

Схемы и группы соединений обмоток наиболее распространены следующие:

звезда—звезда (Y/Y) с выведенной нейтралью 12(0);

треугольник—звезда (Δ/Y) с выведенной нейтралью 11;

звезда с выведенной нейтралью — треугольник 11.

Графические символы отражают схему соединения обмоток, а цифры — группу соединения, т. е. положение часовой стрелки, соответствующее фазовому сдвигу векторов линейных напряжений обмотки НН относительно линейных напряжений обмотки ВН. Эти цифры получаются как частное от деления значения углового сдвига в электрических градусах на 30, так что, например, «11 часов» соответствует фазовому сдвигу на угол 330 град. эл. В зависимости от полярности включения фазных обмоток и схемы их соединения между собой всего может быть получено 12 групп соединения.

При симметричной нагрузке всех фаз трансформатора с выведенной нейтралью ток небаланса в нулевом проводе невелик. Значение его у трансформаторов со схемой «звезда—звезда» не должно превосходить 0,25, «треугольник—звезда» — 0,75 номинального тока обмотки НН во избежание перегрева и повреждения трансформатора. Соединение обмотки ВН в треугольник обеспечивает также значительно большие токи при однофазных КЗ в сети НН с заземленной нейтралью, что повышает надежность работы максимальной защиты. Поэтому при мощности 400 кВ·А и больше предпочтительно применение трансформаторов со схемой соединения обмоток ВН в треугольник.

Напряжение короткого замыкания (u_k) — это то пониженное значение напряжения (в процентах от номинального), которое надо приложить к одной из обмоток трансформатора, чтобы при замкнутой накоротко другой обмотке значения токов в обмотках были равны номинальным. Средние значения u_k для масляных трансформаторов находятся в пределах 4—6 %, сухих трансформаторов — около 5,5 %.

Объем испытаний трансформаторов (автотрансформаторов, реакторов) при наладке обусловлен ПУЭ 1.8.16, ПТЭЭП, действующими руководящими документами и материалами, а также инструкциями заводов-изготовителей.

Перед началом испытаний необходимо произвести внешний осмотр трансформатора, проверить исправность бака и радиаторов, состояние изоляторов, уровень масла, положение кранов на радиаторе и маслопроводе к расширите-

лю, целость маслоуказательного стекла, заземление, а также наличие противопожарных средств.

Условия включения масляных трансформаторов без сушки определяются руководящими техническими документами и материалами и инструкциями заводов-изготовителей. Соответствующие испытания и измерения производятся наладочной организацией. Объем проверки и условия включения зависят от мощности, класса напряжения и условий транспортировки трансформатора (с маслом, с расширителем или без него). Окончательное решение о включении принимает владелец электроустановки.

1. Измерение характеристик изоляции

1.1. Параметры изоляции.

При определении характеристик изоляции температура ее должна быть не ниже 10 °С. За температуру изоляции длительно отключенного или не подвергавшегося нагреву трансформатора принимается температура верхних слоев масла. Для трансформаторов без масла измерения производятся термометром, помещенным в карман термосигнализатора на крышке бака. При этом карман следует заполнить трансформаторным маслом.

Если температура трансформаторного масла ниже 10 °С, то при измерении характеристик изоляции трансформатор должен быть нагрет. В процессе нагрева температура изоляции принимается равной средней температуре обмотки ВН фазы В, определяемой по сопротивлению обмотки постоянному току. Измерение последнего производится не ранее чем через 60 мин после отключения тока нагрева обмотки или через 30 мин после отключения внешнего источника тепла. Температуру обмотки рекомендуется рассчитывать по формуле:

$$t_x = \frac{R_x - R_0}{R_0} (235 + t_0) + t_0,$$

где R_x — измеренное значение сопротивления обмотки при температуре t_x ; R_0 — сопротивление обмотки, измеренное на заводе-изготовителе при температуре t_0 (из паспорта); 235 — коэффициент для медных обмоток, для алюминиевых — 245.

Измерение характеристик изоляции следует производить не ранее, чем через 12 ч после окончания заливки масла. Перед измерением необходимо протереть поверхность вводов трансформатора. Все вводы одного напряжения соединяют вместе, остальные обмотки и бак трансформатора заземляют, присоединив заземляющий проводник к специальному заземляющему болту (табл. 1).

Таблица 1. Схемы измерения характеристик изоляции трансформаторов

| Двухобмоточные трансформаторы | | Трехобмоточные трансформаторы | |
|--|----------------------------------|--|----------------------------------|
| Обмотки, на которых производятся измерения | Заземляемые части трансформатора | Обмотки, на которых производятся измерения | Заземляемые части трансформатора |
| НН | Бак, ВН | НН | Бак, СН, ВН |
| ВН | Бак, НН | СН | Бак, ВН, НН |
| ВН+НН | Бак | ВН | Бак, НН, СН |
| | | ВН+СН | Бак, НН |
| | | ВН+СН+НН | Бак |

К электрическим показателям состояния изоляции относятся ее сопротивление постоянному току, тангенс угла потерь, емкости. Электрическая схема замещения изоляции как неоднородного диэлектрика представлена на рис. 1.

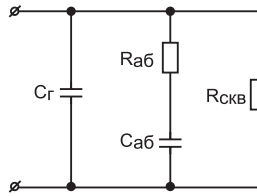


Рис. 1. Схема замещения изоляции: C_{Γ} — геометрическая емкость; $R_{аб}$ и $C_{аб}$ — активное сопротивление и емкость абсорбционной ветви; $R_{скв}$ — сопротивление изоляции установившемуся постоянному току

При приложении к зажимам схемы постоянного напряжения U в ней возникает ток, являющийся геометрической суммой трех составляющих:

а) емкостной ток I_{Γ} обусловлен так называемой геометрической емкостью C_{Γ} , имеет импульсный характер и не оказывает влияния на результаты измерения сопротивления постоянному току;

б) ток $I_{аб}$ отражает процесс заряда слоев диэлектрика через сопротивление изоляции предшествующего слоя. С увлажнением изоляции сопротивление $R_{аб}$ снижается, а емкость $C_{аб}$ возрастает, поскольку увлажненные слои диэлектрика становятся полупроводящими; толщина сухого слоя диэлектрика снижается. Как следствие, начальное значение тока $I_{аб}$ возрастает и он быстрее спадает до нуля;

в) ток сквозной проводимости $I_{скв}$, или ток утечки, через сопротивление $R_{скв}$, обусловленное как наружным загрязнением изоляции, так и наличием в ней путей сквозной утечки.

При измерении сопротивления изоляции постоянному току показания прибора будут возрастать по мере спада тока абсорбции $I_{аб}$. Время установления тока обычно не превышает 60 с, хотя для сухой и исправной изоляции оно может быть значительно больше. Сопротивление изоляции постоянному току дает представление о состоянии изоляции главным образом в отношении ее увлажнения и загрязнения.

Векторная диаграмма токов в схеме рис. 1, включенной на переменное напряжение, показана на рис. 2.

Потери в изоляции создаются в основном абсорбционным током $I_{аб} \approx I_a$:

$$P = UI \cos \varphi = UI_a = UI_c \operatorname{tg} \delta.$$

Отношение активной составляющей I_a полного тока I к его емкостной составляющей I_c называется тангенсом угла диэлектрических потерь и выражается в процентах:

$$\operatorname{tg} \delta \% = \frac{I_a}{I_c} 100.$$

Как видно из рис. 2, угол δ , дополняющий фазный угол φ до 90° , обусловлен наличием активных потерь. При отсутствии потерь, в идеальном диэлектрике $\delta = 0$ и соответственно $\operatorname{tg} \delta = 0$.

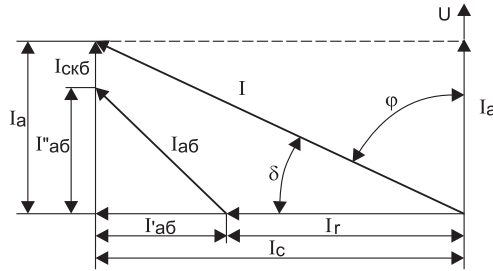


Рис. 2. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями: φ — угол фазного сдвига между приложенным напряжением и полным током через диэлектрик; δ — угол между полным током и его емкостной составляющей (сильно преувеличен)

Треугольник токов I , I_a и I_c на векторной диаграмме рис. 2 соответствует схеме параллельного соединения активного сопротивления и емкости, которая может быть заменена эквивалентной схемой последовательного соединения (рис. 3). В этой схеме

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{R_x}{X} \omega R_x C_x.$$

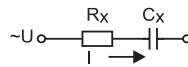


Рис. 3. Эквивалентная последовательная схема замещения изоляции

Увлажнение и другие дефекты изоляции вызывают увеличение активной составляющей тока I_a , диэлектрических потерь и $\operatorname{tg} \delta$. Поскольку при этом активная составляющая I_a растет значительно быстрее, чем емкостная I_c , показатель $\operatorname{tg} \delta$ отражает изменение состояния изоляции и потери в ней. Вместе с тем он определяет лишь общую, усредненную характеристику изоляции, тогда как местные и сосредоточенные дефекты в изоляции большого объема измерением $\operatorname{tg} \delta$ обнаруживаются плохо; при малом объеме изоляции удастся обнаружить развитые местные и сосредоточенные дефекты.

1.2. Измерение сопротивления изоляции.

Перед началом измерения все обмотки должны быть заземлены не менее чем на 5 мин, а между отдельными измерениями — не менее чем на 2 мин для снятия емкостного заряда. Измерение производится мегаомметром 2500 В с верхним пределом измерения не ниже 10 000 МОм. Показания мегаомметра отсчитываются через 15 (R_{15}) и 60 с (R_{60}) после приложения напряжения к изоляции обмотки. Значения R_{60} , измеренные при заводской температуре или приведенные к ней, для вновь вводимых трансформаторов на напряжение до 35 кВ мощностью до 10 МВ·А, залитых маслом, должны быть не менее указанных в табл. 2.

Таблица 2. Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции обмоток масляных трансформаторов, МОм

| | Температура обмотки, °С | | | | | | |
|--|-------------------------|-----|-----|-----|----|----|----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| До 10 000 включительно. Сопротивление изоляции R_{60} | 450 | 300 | 200 | 130 | 90 | 60 | 40 |

Для приведения значений R_{60} , измеренных на заводе-изготовителе, к температуре измерения при наладке производится пересчет с помощью коэффициента K (табл. 3).

Таблица 3. Значения коэффициента K в зависимости от температуры

| Разность температур $t_2 - t_1$, °С | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент K | 1,23 | 1,50 | 1,84 | 2,25 | 2,75 | 3,40 | 4,15 | 5,10 | 6,20 | 7,50 |

Примечание. Здесь t_2 — наибольшая температура; t_1 — наименьшая температура.

Для сухих силовых трансформаторов значения R_{60} при температуре 20—30 °С должно быть не ниже указанных в табл. 4.

Таблица 4. Наименьшие допустимые значения сопротивления изоляции R_{60} обмоток сухих силовых трансформаторов

| Номинальное напряжение трансформаторов, кВ | Сопротивление изоляции, МОм |
|--|-----------------------------|
| До 1 | 100 |
| 1—6 | 300 |
| Более 6 | 500 |

Примечание. Значения R_{60} относятся ко всем обмоткам трансформатора

Для остальных трансформаторов сопротивление изоляции, приведенное к температуре, при которой производились измерения на заводе-изготовителе, должно составлять не менее 50 % исходного значения.

1.3. Измерение коэффициента абсорбции.

По результатам измерения сопротивления изоляции определяется коэффициент абсорбции R_{60}/R_{15} , который при температуре 10—30 °С должен быть не ниже 1,3. Это измерение обязательным не является.

1.4. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

Измерение $\text{tg } \delta$ производят мостами переменного тока типа МД-16, Р5026, Р595, принципиальная схема которых приведена на рис. 4, или иными приборами аналогичного назначения.

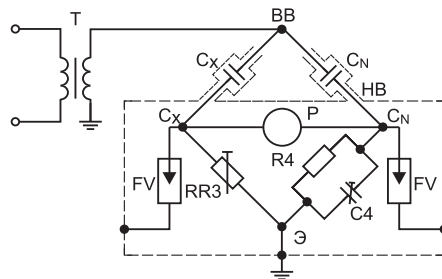


Рис. 4. Принципиальная схема моста Шеринга

Эти приборы являются, по-существу, измерителями емкости (мост Шеринга). При равновесии моста обеспечивается равенство

$$\text{tg } \delta = \omega R_x C_x = \omega R_4 C_4.$$

В мостах МД-16 принято $R_4 = 10^4/\pi = 3184$ Ом, а уравнивание моста достигается изменением емкости C_4 .

Применяют две схемы включения моста: нормальную (рис. 5а), в которой измерительный элемент P включен между одним из электродов испытуемого диэлектрика C_x и землей, и перевернутую (рис. 5б), в которой измерительный элемент включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокового напряжения моста. Нормальная схема применяется, когда оба электрода изолированы от земли, например при измерении $\text{tg } \delta$ изоляции между обмотками трансформатора. Для измерения $\text{tg } \delta$ объектов, у которых один из электродов наглухо соединен с землей (например, магнитопровод трансформатора, фланец ввода и т. п.), применяют перевернутую схему. Необходимо иметь в виду, что в этом случае отдельные элементы моста находятся под испытательным напряжением. Для трансформаторов, залитых маслом, значение испытательного напряжения должно быть не более 60 % заводского испытательного и не выше 10 кВ.

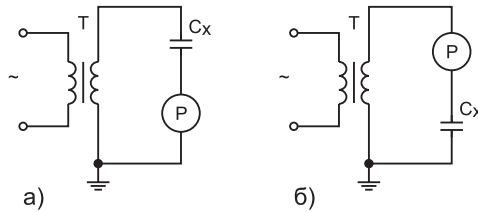


Рис. 5. Измерение $\text{tg } \delta$ по нормальной (а) и перевернутой (б) схемам: C_x — объект измерения; P — мост; T — испытательный трансформатор

На высоком напряжении мост используется с внешним образцовым воздушным конденсатором типа Р5023. В качестве источника напряжения до 10 кВ обычно применяют измерительный трансформатор напряжения типа НОМ-10 или НОМ-6. Мост и необходимую аппаратуру размещают в непосредственной близости от испытуемого объекта и устанавливают ограждение (см., например, рис. 6). Провод, идущий от испытательного трансформатора T к образцовому конденсатору C_N , а также соединительные кабели моста P ,

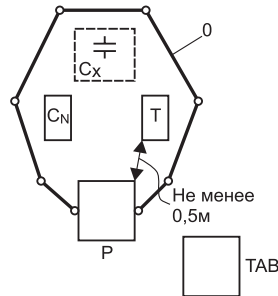


Рис. 6. Схема расположения аппаратов при измерении $\text{tg } \delta$: C_x — объект измерения; C_N — образцовый конденсатор; T — испытательный трансформатор; P — мост; TAB — регулировочный автотрансформатор; 0 — переносное ограждение

находящиеся под напряжением, должны быть удалены от заземленных предметов не менее чем на 100...150 мм. Трансформатор Т и его регулирующее устройство ТАВ (ЛАТР) должны отстоять от моста не менее чем на 0,5 м. Корпуса моста Р, трансформатора Т и регулировочного устройства ТАВ, а также один вывод вторичной обмотки трансформатора Т заземляют.

На результаты измерения $\operatorname{tg} \delta$ могут оказывать влияние магнитные и электростатические поля. Это влияние частично можно учесть, выполнив измерение четыре раза, при разных полярностях подаваемого испытательного напряжения и включения гальванометра. Наиболее эффективной мерой является такой подбор фазы питающего напряжения, при котором влияние минимально. Практически это удобно осуществить питанием схемы от той из фаз АВ, ВА; АС, СА или ВС, СВ, при которой результат измерения минимален.

Измеренные значения $\operatorname{tg} \delta$ сравнивают с данными протокола заводских испытаний, от которых они не должны отличаться в сторону ухудшения более чем на 50 %. При отсутствии на объекте сведений о результатах заводских испытаний можно ориентироваться на данные табл. 5 (для вновь вводимых трансформаторов классов напряжения обмотки ВН, залитых маслом, до 35 кВ включительно). Заводские данные следует привести к температуре при наладке с помощью коэффициента К (табл. 6).

Таблица 5. Наибольшие допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ (%) изоляции обмоток трансформаторов

| Мощность трансформатора, кВ · А | Температура обмотки, °С | | | | | | |
|---------------------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| До 6300 включительно | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,4 | 4,5 | 6,0 |
| 10 000 и более | 0,8 | 1,0 | 1,3 | 1,7 | 2,3 | 3,0 | 4,0 |

Таблица 6. Коэффициенты для пересчета заводских значений $\operatorname{tg} \delta$ к температуре при наладке

| Разность температур, °С | 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
|-------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Коэффициент К | 1,15 | 1,31 | 1,75 | 2,3 | 3,0 | 4,0 | 5,3 | 7,0 |

Измерение $\operatorname{tg} \delta$ трансформаторов мощностью до 1600 кВ · А не обязательно.

1.5. Определение отношения C_2/C_{50} .

Эта величина представляет собой отношение емкости при частоте 2 Гц к емкости при частоте 50 Гц и характеризует увлажненность изоляции трансформатора. На частоте 50 Гц успевает проявиться только геометрическая емкость, одинаковая при сухой и влажной изоляции. На частоте 2 Гц проявляется и абсорбционная емкость, которая при влажной изоляции больше, чем при сухой. Для увлажненной изоляции отношение C_2/C_{50} приближается к 2, для сухой — близко к 1.

Измерения производятся прибором типа ПКВ-13 по схемам табл. 1 для трансформаторов, залитых маслом (как правило); допустимые значения C_2/C_{50} приведены в табл. 7.

Местные увлажнения выявляются этим методом плохо.

Таблица 7. Наибольшие допустимые значения C_2/C_{50} обмоток трансформаторов в масле

| Мощность трансформатора, кВ · А | Температура обмотки, °С | | |
|---------------------------------|-------------------------|------|------|
| | 10 | 20 | 30 |
| До 6300 включительно | 1,1 | 1,2 | 1,3 |
| 10 000 | 1,05 | 1,15 | 1,25 |

1.6. Определение $\Delta C/C$ (метод «емкость—время»).

Эта величина представляет собой отношение приращения емкости за определенный промежуток времени (например, 1 с) к измеренному значению емкости. Приращение происходит за счет абсорбционной емкости, которая успевает за это время проявиться у влажной изоляции и не успевает у сухой. Метод «емкость—время» применяется, как правило, для трансформаторов, не заполненных маслом, в связи с тем что отношение $\Delta C/C$ сильно зависит от $\operatorname{tg} \delta$ масла. Этот метод является самым чувствительным из всех известных в настоящее время методов контроля влажности изоляции. Допустимые значения $\Delta C/C$ приведены в табл. 8.

Примечание. ПУЭ, 7-е изд., и ПТЭЭП испытаний по п. 1.5 и 1.6 не требуют; они могут производиться, если владелец электроустановки или представитель завода-изготовителя сочтут это необходимым.

Таблица 8. Наибольшие допустимые значения $\Delta C/C$ обмоток трансформатора без масла

| Класс напряжения обмотки ВН, мощность трансформатора | Температура, °С | Значение $\Delta C/C$, % | Приращение $\Delta C/C$, % |
|--|-----------------|---------------------------|-----------------------------|
| До 35 кВ включительно, мощностью до 6300 кВ · А включительно | 10 | 13 | 4 |
| | 20 | 20 | 6 |
| | 30 | 30 | 9 |
| | 40 | 45 | 13,5 |
| | 50 | 75 | 22 |
| До 35 кВ включительно, мощностью до 10000 кВ · А и более и 110 кВ независимо от мощности | 10 | 8 | 3 |
| | 20 | 12 | 4 |
| | 30 | 18 | 5 |
| | 40 | 29 | 8,5 |
| | 50 | 44 | 13 |

Измерения производятся прибором типа ЕВ-3. Мерой емкости служит количество электричества, измеренное при ее разряде за определенный промежуток времени. Вначале предварительно заряженный объект, например обмотку трансформатора, разряжают на запоминающий конденсатор, установившееся напряжение на котором будет пропорционально геометрической

емкости C . При измерении приращения емкости C запоминающий конденсатор разряжается на емкость объекта.

Отношение $\Delta C/C$ растет с повышением не только влажности изоляции, но и температуры. Перерасчет от температуры t_2 к температуре t_1 производят умножением значения $\Delta C/C$ на коэффициент K из табл. 9. Если трансформатор подвергался ревизии, то ограничиваются также и приращения $\Delta C/C$, измеренные в конце и в начале ревизии и приведенных к одной и той же температуре (см. табл. 8).

Таблица 9. Значения коэффициента для пересчета отношения $\Delta C/C$

| Разница температур, t_2-t_1 , °C | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|------|
| Значение коэффициента K | 1,25 | 1,55 | 1,95 | 2,40 | 3,00 | 3,70 | 4,60 | 5,70 | 7,0 | 8,80 |

2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты

Испытывается изоляция обмоток вместе с вводами повышенным напряжением от постороннего источника. Значения испытательного напряжения приведены в табл. 10, продолжительность испытания — 1 мин.

Таблица 10. Значения испытательного напряжения изоляции трансформаторов

| Класс напряжения обмотки, кВ | До 1 кВ | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 | 35 |
|------------------------------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|------|------|
| Испытательное напряжение, кВ | 4,5/2,7 | 16,2/9,0 | 22,5/15,4 | 31,5/21,6 | 40,5/33,5 | 49,5 | 76,5 |

Примечание. В числителе дроби указаны значения испытательного напряжения для масляных трансформаторов, автотрансформаторов, масляных реакторов и дугогасящих катушек с нормальной изоляцией, в знаменателе — для трансформаторов с облегченной изоляцией.

Мощность источника испытательного напряжения (повышающего трансформатора) может быть рассчитана по формуле:

$$P = \omega C_x U U_{\text{ном}} \cdot 10^{-9} \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

где C_x — емкость изоляции испытываемого трансформатора, пФ; U — испытательное напряжение, кВ; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение обмотки ВН испытательного трансформатора, кВ; ω — угловая частота испытательного напряжения ($\omega = 314$ 1/с). Ориентировочно емкость высоковольтных вводов составляет 50—800 пФ, силовых трансформаторов — 1000—10 000 пФ. При необходимости емкость трансформатора можно измерить на низком напряжении мостом или с помощью амперметра и вольтметра.

В качестве испытательных трансформаторов можно, кроме специальных, использовать другие силовые трансформаторы, а также трансформаторы напряжения. Полезно иметь в виду, что силовые трансформаторы допускают при этом перегрузку по току до 250 % номинального значения. Трансформаторы напряжения типа НОМ допускают повышение напряжения на первичной обмотке до 150—170 % номинального. При отсутствии испытательного трансформатора достаточной мощности возможно параллельное включение двух однотипных трансформаторов.

Трансформатор считается выдержавшим испытание, если не произошло пробоя или перекрытия изоляции, замеченных по звуку, выделению газа и дыма или по характерным показаниям приборов (падение напряжения и резкое увеличение тока утечки при пробое).

Испытание производится при удовлетворительных результатах проверки состояния изоляции обмоток. До и после испытания необходимо измерить сопротивление изоляции, значение которого за время испытания не должно уменьшиться.

3. Измерение сопротивления обмоток постоянному току

Измерение производится на всех ответвлениях, если для этого не потребуются выемки сердечника. Измеряются линейные сопротивления на всех ответвлениях обмоток всех фаз. При наличии нулевого вывода дополнительно измеряется одно из фазных сопротивлений. Измерения малых сопротивлений производят миллиомметром (по четырехпроводной схеме) или методом амперметра-вольтметра.

При измерении методом амперметра-вольтметра необходимо иметь в виду, что сопротивление обмотки трансформатора представляет собой комплексную величину с малой активной составляющей и значительной индуктивностью, причем постоянная времени обмотки тем больше, чем больше мощность трансформатора. Поэтому при подаче на обмотку постоянного напряжения измерительный ток I в ней устанавливается не сразу, а падение напряжения $U = I r_0$ на измеряемом сопротивлении r_0 сравнительно невелико, до нескольких вольт. Примерные ориентировочные значения сопротивления r_0 , индуктивности L и постоянной времени $T = L/r_0$ обмоток ряда трансформаторов приведены в табл. 11. Поскольку для достижения установившегося значения тока в обмотке требуется время не менее $5T$ (отклонение менее 1%), то, как видно из таблицы, уже для трансформаторов мощностью порядка $1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ это время составляет несколько минут.

Таблица 11. Ориентировочные значения некоторых параметров обмоток силовых трансформаторов на напряжение 10 кВ

| Мощность трансформатора S , $\text{кВ} \cdot \text{А}$ | Сопротивление постоянному току r_0 , Ом | Индуктивность L , Гн | Постоянная времени T , с |
|--|---|------------------------|----------------------------|
| 10 | 120 | 75 | 0,5 |
| 25 | 70 | 70 | 1,0 |
| 63 | 25 | 64 | 2,5 |
| 100 | 11 | 58 | 5,5 |
| 160 | 6 | 50 | 8 |
| 250 | 3 | 36 | 12 |
| 400 | 1,5 | 27 | 18 |
| 630 | 1,0 | 34 | 34 |
| 1000 | 0,5 | 21 | 42 |
| 1600 | 0,3 | 13 | 44 |
| 6300 | 0,06 | 6 | 100 |
| 25000 | 0,01 | 2 | 200 |
| 63000 | 0,002 | 1 | 500 |

Примечание. Ориентировочные значения сопротивления и индуктивности других обмоток трансформатора можно рассчитать путем умножения на квадрат коэффициента трансформации.

При испытаниях указанные выше особенности учитываются следующим образом.

Напряжение источника питания не должно быть чрезмерно велико, значение его выбирается обычно в пределах нескольких десятков вольт. Во избежание повреждения вольтметра от перенапряжений, возникающих при изменении тока, вначале подают напряжение на обмотку, а вольтметр подсоединяют после того, как ток достигнет установившегося значения; по окончании измерений сперва отсоединяют вольтметр, затем прерывают ток. Провода цепи вольтметра подсоединяют к зажимам трансформатора непосредственно, чтобы исключить падение напряжения на амперметре. Принимают меры для сокращения длительности переходного процесса:

а) напряжение источника постоянного тока U_0 выбирают в несколько раз больше, чем ожидаемое значение падения напряжения ΔU : $U_0 \gg \Delta U$. В процессе измерения постепенно уменьшают приложенное напряжение от U_0 доли или увеличивают сопротивление измерительной цепи так, чтобы значение измерительного тока оставалось в пределах 20 % номинального тока обмотки. При кратковременных (до 1 мин) измерениях допускается повышать значение тока;

б) в измерительную цепь вводят дополнительное активное сопротивление r_d , уменьшая тем самым постоянную времени цепи $T = L/(r + r_d)$.

Измеренное значение не должно отличаться более чем на 2 % от среднего значения сопротивления, полученного на том же ответвлении для других фаз, или от данных завода-изготовителя. Для сравнения измеренных сопротивлений их значения должны быть приведены к одной и той же температуре:

для обмоток из алюминия

$$R_2 = R_1 \frac{245 + t_2}{245 + t_1};$$

для обмоток из меди

$$R_2 = R_1 \frac{235 + t_2}{235 + t_1},$$

где R_2 — сопротивление, приводимое к температуре t_2 ; R_1 — сопротивление, измеренное при температуре t_1 .

Должна соблюдаться одинаковая для всех фаз закономерность изменения сопротивления постоянному току, соответствующая положениям переключателя. Особое внимание следует обращать на изменение сопротивления по отпайкам у трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой, где возможны нарушения этой закономерности из-за неправильного сочленения валов переключателя и привода, ошибочного подсоединения отпайки к переключающему устройству или неправильной работы привода. Ввиду малой разницы значений сопротивления смежных отпайки эти измерения удобнее производить цифровыми приборами.

Внимание! При разрыве цепи тока в схеме амперметра-вольтметра на свободных обмотках трансформатора может индуцироваться опасное напряжение.

4. Проверка коэффициента трансформации

Коэффициентом трансформации называют отношение напряжения обмотки ВН к напряжению обмотки НН в режиме холостого хода:

$$k = \frac{U_1}{U_2},$$

для трехобмоточных трансформаторов — отношение напряжений обмоток ВН/СН, ВН/НН и СН/НН. Коэффициент трансформации определяют для проверки соответствия паспортным данным, а также для проверки правильности подсоединения ответвлений обмоток к переключателям.

Измерения производят методом двух вольтметров класса точности не ниже 0,5, на всех ответвлениях обмоток и для всех фаз. Подводимое напряжение должно быть в пределах 1—100 % номинального напряжения обмотки. В большинстве случаев подают напряжение $3 \times 0,4$ кВ со стороны ВН.

При испытании трехфазных трансформаторов измеряют линейные напряжения на одноименных зажимах обеих обмоток. Если возможно измерить фазные напряжения, то коэффициент трансформации можно определить и по фазным напряжениям. При отсутствии симметричного трехфазного напряжения коэффициент трансформации трехфазных трансформаторов со схемой соединения Y/Δ или Δ/Y можно определить путем однофазного возбуждения. Для этого одну из фаз обмотки, соединенной в треугольник, поочередно закорачивают и проводят измерения на свободных фазах. При схеме Y/Δ фазные коэффициенты трансформации будут равны:

$$k_{1\phi} = \frac{U_{AB}}{2U_{ab}}; \quad k_{2\phi} = \frac{U_{BC}}{2U_{bc}}; \quad k_{3\phi} = \frac{U_{AC}}{2U_{ac}}.$$

Переход к линейному коэффициенту трансформации осуществляется умножением фазного на $\sqrt{3}$. При схеме Δ/Y фазные коэффициенты трансформации будут равны:

$$k_{3\phi} = \frac{U_{AC}}{2U_{ac}}; \quad k_{2\phi} = \frac{U_{BC}}{2U_{bc}}; \quad k_{1\phi} = \frac{U_{AB}}{2U_{ab}}.$$

Переход к линейному коэффициенту трансформации осуществляется делением фазного на $\sqrt{3}$. При схеме Y/Δ напряжение подводится поочередно к каждой фазе; закорачивать их при этом не надо.

Измеренный коэффициент трансформации не должен отличаться более чем на 2 % от значения, полученного на том же ответвлении других фаз, или от заводских данных. Для трансформаторов с РПН разница не должна превышать значения ступени регулирования. При испытании трехобмоточных трансформаторов достаточно определить коэффициент трансформации у двух пар обмоток, при этом желательно, чтобы в каждую проверяемую пару входила обмотка без ответвлений.

5. Проверка группы соединения трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов

Производится при отсутствии паспортных данных или сомнения в их достоверности. У трехобмоточных трансформаторов группу обычно определяют для обмоток ВН/СН и ВН/НН. Согласно ПУЭ измерения производятся у трансформаторов мощностью $1000 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и более при напряжении на обмотке НН, равном указанному в протоколе заводских испытаний, но не более 380 В . Потери холостого хода трехфазных трансформаторов измеряются при однофазном возбуждении по схемам изготовителя. При вводе в эксплуатацию соотношение потерь на разных фазах трехфазных трансформаторов не должно отличаться от заводских данных более чем на 2% , а у однофазных трансформаторов отличие измеренных значений потерь от исходных не должно превышать 10% .

Промышленностью выпускаются трансформаторы преимущественно с группами соединения $12 (0)$ и 11 , за исключением трансформаторов специального назначения и производства инофирм. Проверка может производиться различными методами.

Метод фазометра (прямой метод). Последовательную обмотку однофазного фазометра подключают через реостат к зажимам одной из обмоток, а параллельную — к одноименным зажимам другой обмотки испытуемого трансформатора. К этим зажимам подводится напряжение, достаточное для нормальной работы фазометра; силу тока в последовательной обмотке ограничивают до номинального значения посредством реостата. Группу соединения определяют по измеренному углу сдвига V между векторами напряжений обмоток ($\varphi/30$). У трехфазных трансформаторов производят не менее двух измерений (для двух пар линейных зажимов). Схема измерения угла показана на рис. 7.

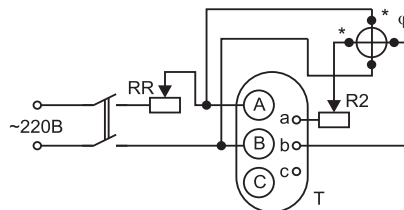


Рис. 7. Проверка группы соединения обмоток трансформатора с помощью фазометра

Метод импульсов постоянного тока (метод поляромера). Используется для однофазных трансформаторов, а также для трехфазных с выведенной нулевой точкой или при соединении обмоток Δ/Δ . К обмотке ВН трансформатора подводится напряжение $2\text{—}12 \text{ В}$ постоянного тока, к обмотке НН подключается

стрелочный вольтметр магнитоэлектрической системы, желательно с нулем по середине; при нуле в начале шкалы стрелку следует сдвинуть вправо с помощью корректора. Батарею и прибор подключают к одноименным зажимам обмоток зажимами одинаковой полярности (рис. 8) и отмечают отклонения стрелки прибора при включении батареи: отклонения вправо обозначаются знаком «+», влево «-». Полученные результаты сравнивают с данными табл. 12.

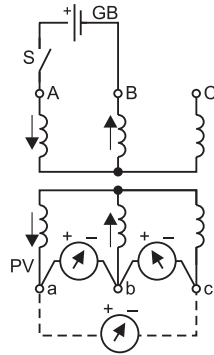


Рис. 8. Проверка группы соединения обмоток трансформатора импульсным методом

Таблица 12. Показания прибора при определении групп соединения обмоток трансформатора импульсным методом

| Питание подведено к зажимам | Отклонение стрелки прибора, присоединенного к зажимам | | | | | |
|-----------------------------|---|----|----|-----------|----|----|
| | ав | вс | са | ав | вс | са |
| | группа 0 | | | группа 11 | | |
| AB | + | - | - | + | 0 | - |
| BC | - | + | - | - | + | 0 |
| CA | - | - | + | 0 | - | + |

Метод двух вольтметров. Соединяют зажимы А и а трансформатора (рис. 9). К одной из его обмоток подводят напряжение (обычно 220 В) и измеряют поочередно напряжение между зажимами в—В, в—С, с—В (х—Х при испытании однофазных трансформаторов). Измеренные значения напряже-

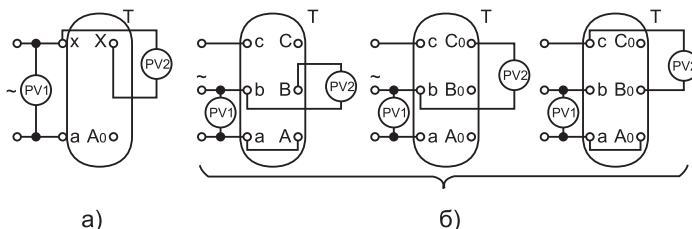
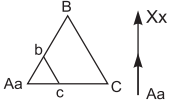
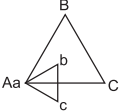
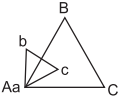


Рис. 9. Проверка группы соединения обмоток трансформатора методом двух вольтметров: а — для однофазного трансформатора; б — для трехфазного трансформатора

ния сравнивают с расчетными из табл. 13, где U_2 — линейное напряжение на зажимах обмотки НН, K_L — линейный коэффициент трансформации.

Таблица 13. Векторные диаграммы и расчетные формулы для определения группы соединения обмоток трансформаторов (группы 0; 1 и 11)

| Возможное соединение обмоток и векторная диаграмма линейных ЭДС | $U_{b-B} (U_x - \chi)$ | $U_b - c$ | $U_c - B$ |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| УУ; ДД; ДЗ  | $U_2(K_L - 1)$ | $U_2\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$ | $U_2\sqrt{1 - K_L + K_L^2}$ |
| УД; ДУ; ДЗ  | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$ | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$ | $U_2\sqrt{1 + K_L^2}$ |
| УД; ДУ; УЗ  | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$ | $U_2\sqrt{1 + K_L^2}$ | $U_2\sqrt{1 - \sqrt{3}K_L + K_L^2}$ |

6. Измерение тока и потерь холостого хода (ХХ)

Ток и потери ХХ определяют из опыта холостого хода. Опыт ХХ называют испытание, при котором к одной из обмоток трансформатора (обычно НН) подводится напряжение промышленной частоты и практически синусоидальной формы, причем другие обмотки остаются незамкнутыми; трехфазное напряжение, кроме того, должно быть симметричным. При опыте ХХ могут быть выявлены витковые замыкания и повреждения в активной части магнитопровода (замыкание между листами электротехнической стали).

Можно считать, что мощность ХХ расходуется только на потери в стали; ток ХХ создает магнитный поток в сердечнике. Значение тока ХХ выражается в процентах от номинального тока трансформатора.

В трехфазных трансформаторах значения тока ХХ различных фаз неодинаковы: в средней фазе оно обычно на 20—35 % меньше, чем в крайних, из-за меньшей длины пути магнитного потока. Поэтому значение тока ХХ трехфазного трансформатора определяют как среднеарифметическое значение токов трех фаз:

$$I_X = \frac{I_A + I_B + I_C}{3} 100 \%$$

Измерения могут быть проведены при номинальном или пониженном напряжении. Во втором случае используют однофазное линейное напряжение, так как форма его кривой ближе к синусоиде, чем фазного. Приборы, применяемые для определения потерь ХХ, должны иметь класс точности не ниже 0,5. Измерения производят до начала других испытаний трансформатора, особенно связанных с подачей напряжения постоянного тока (измерение сопротивления постоянному току обмоток и $R_{из}$, прогрев постоянным током и др.) и остаточным намагничиванием. Если магнитопровод трансформатора был намагничен, определенные при пониженном напряжении потери холостого хода могут в 1,5—2 раза превысить результаты заводских или аналогичных измерений.

Измерения без приведения потерь к номинальному напряжению (метод сравнения) имеют то преимущество, что подводимое напряжение может выбираться в интервале 1—50 % номинального, т. е. почти всегда может быть использовано напряжение 220 или 380 В. Для трехфазных трансформаторов одно и то же напряжение поочередно подводят:

- к линейному и нулевому зажимам (например, а—0; в—0; с—0), если возбуждаемая обмотка соединена в звезду с выведенной нейтралью;
- к двум линейным зажимам (например, а—в; в—с; а—с), если обмотка соединена в звезду с недоступной нейтралью или в треугольник.

Измерения выполняют по схемам рис. 10. Сначала измеряют суммарную мощность $P_{изм}$, потребляемую трансформатором и измерительными прибора-

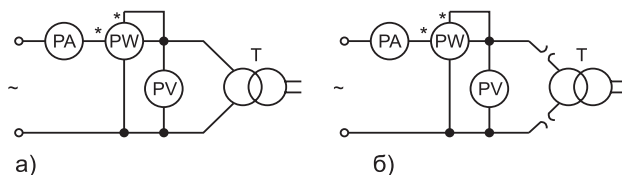


Рис. 10. Измерение потерь ХХ трансформатора (для одной пары зажимов): а — суммарных потерь; б — потерь в приборах

ми, а затем, исключив трансформатор, мощность $P_{пр}$, потребляемую приборами. Потери в трансформаторе находят как разность

$$P_{исп} = P_{изм} - P_{пр}.$$

Оценку результатов производят сопоставлением измеренных при испытаниях значений $P_{исп}$ с данными завода-изготовителя или полученными на одинаковых трансформаторах при том же напряжении возбуждения $U_{исп}$.

Измерение с приведением потерь к номинальному напряжению проводится по тем же схемам, но одна из фаз трансформатора при этом поочередно закорачивается (рис. 11). Значение потерь определяется как среднее из трех опытов. Подводимое напряжение выбирается равным 5–10 % номинального напряжения возбуждаемой обмотки.

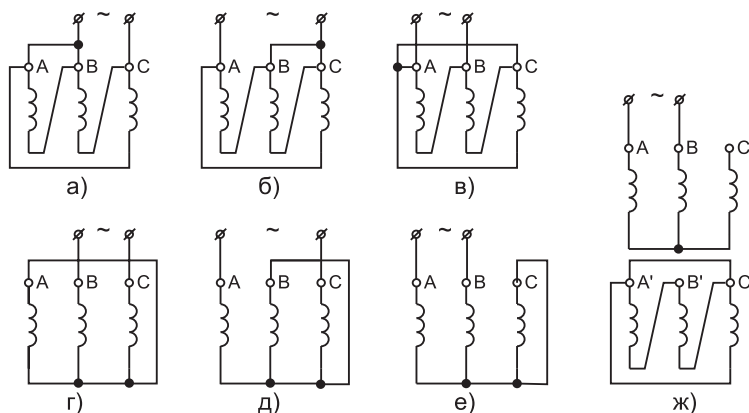


Рис. 11. Схемы однофазного возбуждения трехфазных трансформаторов для измерения потерь ХХ при соединении первичной обмотки: а, б, в — в треугольник; г, д, е — в звезду с выведенной нулевой точкой; ж — в звезду без выведенной нулевой точки

При измерении потерь у трансформаторов с группой соединения Y/Δ можно руководствоваться табл. 14.

Таблица 14

| № опыта | Питание подводится к зажимам НН | Закорачиваются зажимы НН или зажимы ВН | |
|---------|---------------------------------|--|-----|
| 1 | а—в | в—с | С—0 |
| 2 | в—с | а—с | А—0 |
| 3 | а—с | а—в | В—0 |

При отсутствии дефектов потери, измеренные при закорачивании обмоток крайних фаз (А или С), должны быть практически одинаковыми, а при закорачивании средней фазы (В) превышать на 35 % и более потери, полученные при одном из измерений с закорачиванием крайней фазы. Дефектной будет та фаза (обмотка или магнитопровод), при закорачивании которой потери окажутся наименьшими.

Потери $P_{\text{исп}}$, измеренные при напряжении $U_{\text{исп}}$, приводятся к номинальному напряжению U_n по формулам:

$$P_0 = P_{\text{исп}} \left(\frac{U_n \sqrt{3} U_{\text{исп}}}{2} \right)^n$$

— для обмоток, соединенных в звезду, или

$$P_0 = P_{\text{исп}} \left(\frac{U_n}{U_{\text{исп}}} \right)^n$$

— для обмоток, соединенных в треугольник, где n — показатель степени, значения которого зависят от сорта трансформаторной стали и от напряжения, подводимого к трансформатору при опыте. При $U_{\text{исп}} = (5—10\%) U_n$ значение n обычно составляет 1,8 для горячекатаной и 1,9 для холоднокатаной трансформаторной стали.

Значение P_0 сравнивают с данными завода-изготовителя; у исправных трансформаторов расхождение обычно не превышает 5 %.

Измерение при номинальном напряжении производят после включения трансформатора под рабочее напряжение. Амперметры для измерения тока ХХ (и токовые обмотки ваттметров) включают в цепь вторичных обмоток стационарно установленных трансформаторов тока класса Д или 0,5 с небольшой нагрузкой во вторичной цепи. Не рекомендуется применять амперметры выпрямительной системы из-за значительной погрешности, обусловленной несинусоидальностью кривой тока холостого хода.

Оценку результатов измерений производят по соотношению токов фаз и их абсолютному значению.

7. Проверка работы переключающего устройства и снятие круговой диаграммы

Устройства типа РПН осуществляют ступенчатое регулирование напряжения под нагрузкой путем переключения ответвлений обмотки без разрыва цепи тока. Ответвления переключаются подвижными контактами так называемого избирателя в обесточенном состоянии, а разрыв цепи и дугогашение производятся контакторами по двум параллельным ветвям. Сначала контактор разрывает цепь одной ветви, избиратель переходит на последующее ответвление, затем контактор замыкает эту ветвь, подготавливая другую к переключению.

Разрыв дуги может осуществляться в масле, воздухе, вакууме или с применением полупроводниковых приборов. В качестве токоограничивающих элементов применяются реакторы или резисторы. В ряде схем применяется предызбиратель, позволяющий изменять полярность подключения регулировочной обмотки по отношению к основной и тем самым расширить диапазон регулирования напряжения.

Проверку срабатывания переключающего устройства следует производить согласно заводским инструкциям. С этой целью снимают диаграммы последовательности работы устройства, называемые круговыми диаграммами. Круговая диаграмма отражает зависимость моментов действия контактов избирателя, предызбирателя и контактора от углов поворота вала привода или отдельного элемента. Снятие круговой диаграммы следует производить на всех положениях переключателя, одновременно для всех фаз, в обоих направлениях переключения. Последнее требование вызвано тем, что из-за наличия люфтов, т. е. зазоров в механизмах переключения и привода, круговые диаграммы разных направлений отличаются значением угла люфта (угла поворота валов для выбора всех зазоров).

На рис. 12 в качестве примера приведена круговая диаграмма переключающего устройства с контактором (К), избирателем (И) и предызбирателем (ПИ), где обозначены углы поворота вала:

α — от нормального положения до момента размыкания контактора или от момента замыкания контактора до нормального положения;

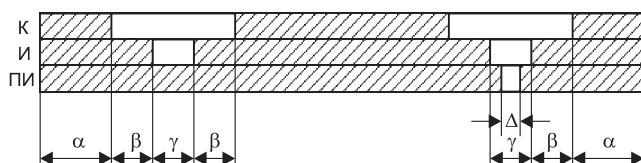


Рис. 12. Типовая круговая диаграмма работы переключающего устройства: К — контактор; И — избиратель; ПИ — предызбиратель; заштрихованная часть — контакт замкнут

β — от момента размыкания контакта контактора до момента размыкания контакта избирателя или от момента замыкания контакта избирателя до момента замыкания контакта контактора;

γ — от момента размыкания контакта избирателя до момента его замыкания;

Δ — от момента размыкания контакта предызбирателя до момента его замыкания.

Угол α гарантирует полное замыкание контактов контактора, в том числе главного контакта, что обеспечивает нормальную эксплуатацию устройства. Угол β должен гарантировать отсутствие одновременного размыкания контактов контактора и избирателя. Недопустимо уменьшение его значения до нуля, так как контакты избирателя не предназначены для разрыва тока. Углы γ и Δ должны быть такими, чтобы исключалась возможность появления дуги на контактах избирателя и предызбирателя, так как они не предназначены для разрыва тока.

Особое внимание обращают на отрезок β , характеризующий перекрытие контактов избирателя. Для устройства типа РНТ-13 этот угол должен быть в пределах $25\text{--}30^\circ$, типа РНТ-18 — $15\text{--}20^\circ$, а типа РНТ-20 — не менее 30° .

Наладка РПН рассматривается ниже на примере устройства типа РНТ-13. Для отсчета углов изготавливают круг (диск) со шкалой на 360° (через 1°) и стрелку из проволоки. Если на крышке привода отсутствует отсчетный лимб, то на вертикальный вал надевается шкала (которую обычно разрезают, чтобы не расцеплять нониусную муфту), а на неподвижной части, к одному из болтов на нониусной муфте, прикрепляют стрелку. Можно поступить и наоборот: шкалу укрепить на нониусной муфте, а стрелку — на одном из болтов в верхней части приводного механизма. Переключающее устройство прокручивают во всем диапазоне регулирования, чтобы убедиться в отсутствии дефектов в механической части привода и регулировочного устройства. Открывают бак контактора и сливают из него некоторое количество масла до тех пор, когда контакты контактора окажутся на воздухе. К контактам подсоединяют сигнальные лампы, а к соответствующим выводам подводят напряжение питания — переменное (например, 36 В) или постоянное 4,5—12 В от батареек или аккумуляторов (рис. 13). По моментам погасания и загорания сигнальных ламп (или с помощью щупа толщиной 0,1—0,2 мм) фиксируют углы поворота вала. Если средняя точка реактора не выведена, диаграмма снимается в два этапа: сначала плеча SAC1-K1, затем плеча SAC2-K2 или наоборот; между контактами свободного контактора вставляют изоляционные прокладки. Перед подачей напряжения на схему одна из нерегулируемых обмоток трансформатора, например обмотка НН, закорачивается.

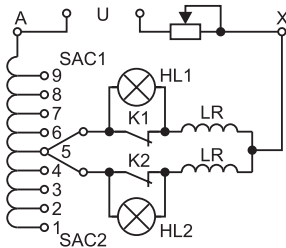


Рис. 13. Схема снятия круговой диаграммы работы переключающего устройства типа РНТ-13

Устанавливают привод в одно из положений, вращая его в том же направлении, в каком будет производиться снятие круговой диаграммы, чтобы выбрать люфты приводного механизма. Положение стрелки на шкале отмечается как услов-

ный нуль. Пусть, например, переключатель, установленный в положение 5 путем вращения привода со стороны положения 4, требуется перевести в положение 6. Вращая рукоятку в сторону положения 6, фиксируют размыкание контакта К1 по зажиганию сигнальной лампы НЛ1. При дальнейшем повороте происходит размыкание контакта SAC1 избирателя с ламелью контакта 5, и сигнальная лампа НЛ1 гаснет. После замыкания контакта SAC1 с ламелью контакта 6 она загорается вновь и горит ярче при замыкании контакта SAC1 в положении 6. При последующем полуобороте вала от 180 до 360° работают контактор К2 и избиратель SAC2 (табл. 15). Далее поворачивают рукоятку еще на 40—50° в сторону положения 7, чтобы исключить влияние люфтов, и снимают эту же часть диаграммы в обратном направлении, т. е. в данном случае при переключении из положения 6 в положение 5. На основании полученных данных строят развернутую диаграмму (рис. 14).

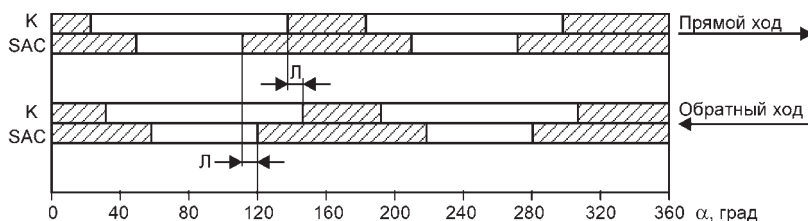


Рис. 14. Развернутая круговая диаграмма работы устройства РНТ-13; Л — угол люфта

Таблица 15. Последовательность работы элементов переключающего устройства типа РНТ-13

| Состояние контактов | Сигнальная лампа | | Углы поворота вертикального вала, град. | | | | | |
|---------------------|------------------|------------|---|---|---|------------------------------------|---|---|
| | НЛ1 | НЛ2 | Ход от положения... к положению | | | Ход от положения... к положению | | |
| | | | А | В | С | А | В | С |
| К1 размыкается | Загорается | Не горит | | | | | | |
| SAC1-5 размыкается | Гаснет | Не горит | | | | | | |
| SAC1-6 замыкается | Загорается | Не горит | | | | | | |
| К1 замыкается | Гаснет | Не горит | | | | | | |
| К2 размыкается | Не горит | Загорается | | | | | | |
| SAC2-5 размыкается | Не горит | Гаснет | | | | | | |
| SAC2-6 замыкается | Не горит | Загорается | | | | | | |
| К2 замыкается | Не горит | Гаснет | | | | | | |

Правильность работы переключателя оценивают по симметрии расположения участков работы контакторов и переключателей, а также по ширине зоны β . В случае необходимости ее следует отрегулировать нониусной муфтой горизонтального вала, находящейся внутри трансформатора. Круговые диаграммы должны соответствовать паспортным данным в пределах допусков завода-изготовителя.

8. Фазировка трансформаторов

Фазировкой называется проверка совпадения по фазам одноименных напряжений включаемого трансформатора и сети или другого, работающего трансформатора. Проверка сводится к отысканию пар выводов, напряжение между которыми равно нулю. На обмотках до 0,4 кВ проверка производится вольтметром, до 10 кВ — указателями напряжения, свыше 10 кВ — с помощью измерительных трансформаторов напряжения. Приборы для фазировки трансформаторов с заземленными нейтралью должны быть рассчитаны на двойное линейное напряжение. На напряжении до 10 кВ используются два указателя напряжения, в один из которых вместо конденсатора и неоновой лампы встроены резисторы сопротивлением 3—4 МОм при напряжении до 6 кВ и 5—7 МОм — при 10 кВ. Зажимы указателей соединяют гибким проводом с усиленной изоляцией.

Как правило, фазировку выполняют на низшем напряжении трансформатора. Сравнимые напряжения должны быть одинаковы по значению (отклонение не более 10 %) и симметричны. Для получения замкнутой цепи обмотки должны иметь общую точку. У трансформаторов с заземленными нейтралью они соединены через землю, а если хотя бы одна из фазиромых обмоток имеет изолированную нейтраль, необходимо соединить любые два вывода обеих обмоток. Такое соединение осуществляют либо временной перемычкой, либо указателями напряжения или оперативными штангами, либо включением одной фазы разъединителя. При фазировке обмоток с заземленными нейтралью проводят девять измерений, с изолированными — четыре. Сказанное иллюстрируется рис. 15 и табл. 16.

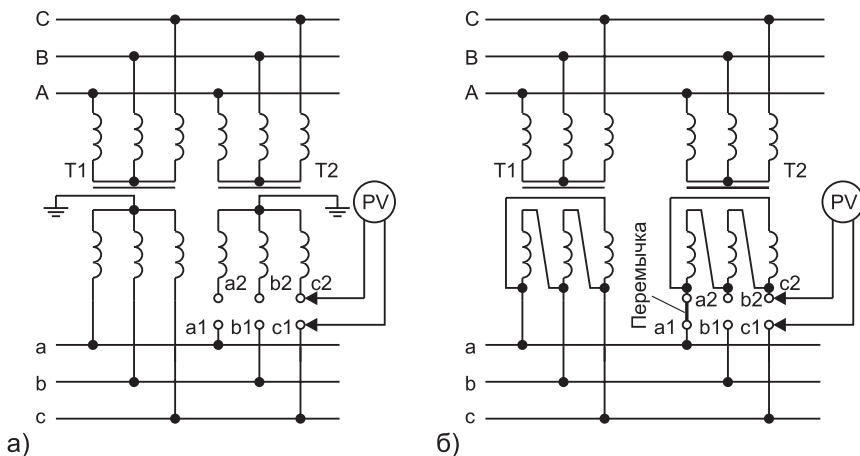


Рис. 15. Фазировка силовых трансформаторов напряжением до 0,4 кВ: T1 — работающий трансформатор; T2 — фазиромый трансформатор

Таблица 16. Схема измерения вольтметром

| Режим нейтрали трансформатора | Напряжение между выводами | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Глухое заземление | а—а | а—в | а—с | в—а | в—в | в—с | с—а | с—в | с—с |
| Изолированная с переключкой на а—а | в—в | | в—с | | с—в | | | с—с | |

Фазировка силовых трансформаторов на напряжении свыше 1 кВ производится с помощью измерительных трансформаторов напряжения, фазировка которых, в свою очередь, должна быть предварительно проверена подачей на них одного и того же напряжения. В остальном фазировка выполняется так же, как и на напряжении до 1000 В (рис. 16).

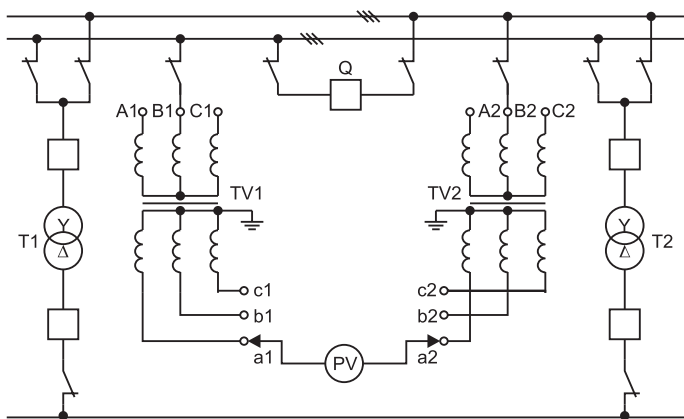


Рис. 16. Фазировка силовых трансформаторов (Т1 и Т2) на напряжении выше 1 кВ с помощью трансформаторов напряжения (ТВ1 и ТВ2); шинно-соединительный выключатель Q отключен

На параллельную работу включаются трансформаторы с одинаковыми группами соединения. В ряде случаев одна группа может быть приведена к другой путем простых пересоединений. Так, возможность параллельной работы групп 0, 4, 8; 6, 10, 2; 11,3, 7; 5, 9, 1, различающихся на 4 часа (120 электрических градусов), обеспечивается круговой перестановкой фаз. Трансформаторы групп 0,4 и 8 могут работать параллельно с трансформаторами групп 6, 10 и 2 (сдвиг на 180 град. эл.), если поменять местами начало и конец первичной или вторичной обмотки одного из трансформаторов. Параллельную работу некоторых нечетных групп можно обеспечить, перекрестив две фазы на высшем и низшем напряжении. В то же время практически невозможно осуществить параллельную работу трансформаторов четных и нечетных групп.

9. Испытание включением толчком на номинальное напряжение

При 3—5-кратном включении не должны иметь место явления, указывающие на неудовлетворительное состояние трансформатора. Этим опытом проверяется также отстройка максимальной токовой защиты от бросков тока намагничивания трансформатора. Физически возникновение сверхтока объясняется следующим. При включении трансформатора возникает переходный процесс, в течение которого магнитный поток можно рассматривать как сумму двух составляющих: периодической с неизменной амплитудой и медленно затухающей аperiodической. В момент включения эти составляющие равны по значению и противоположны по знаку, сумма их равна нулю. Когда же периодическая составляющая приобретает ту же полярность, что и аperiodическая, они суммируются арифметически. Наибольшее возможное значение этой суммы близко к двукратной амплитуде периодической составляющей. Вследствие глубокого насыщения стали магнитопровода бросок тока холостого хода может превысить установившееся значение его в десятки и сотни раз и в 4—6 раз — номинальный ток.

10. Включение трансформатора в работу

Перед пробным включением трансформатора под рабочее напряжение необходимо проверить:

- действие всех предусмотренных защит, которые при этом должны работать на отключение;
- действие механизмов блокировки выключателей;
- показания всех установленных термометров;
- уровень масла в расширителе и его сообщаемость с баком трансформатора;
- положение крана (должен быть открыт) в маслопроводе газового реле;
- отсутствие воздуха в газовом реле;
- соответствие указателя положений переключателя заданному;
- отсутствие посторонних предметов на трансформаторе; заземление бака; отсутствие течи масла.

Включение трансформатора следует, как правило, производить с той стороны, где установлена защита, и в продолжение не менее чем 30 мин провести прослушивание и наблюдение за состоянием трансформатора. При удовлетворительных результатах пробного включения трансформатор может быть включен под нагрузку и сдан в эксплуатацию.

Раздел 2

РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Основные понятия и определения

Линия (фидер) напряжением выше 1000 В может содержать высоковольтные коммутационные аппараты, реакторы, разрядники, измерительные трансформаторы напряжения и тока, изоляторы, шины и токопроводы, силовые кабельные и воздушные линии электропередачи, конденсаторные установки, а также устройства релейной защиты и автоматики.

Несколько фидеров образуют *распределительное устройство* (РУ): открытое (ОРУ), закрытое (ЗРУ), комплектное для внутренней (КРУ) или наружной (КРУН) установки, стационарное (КСО).

Силовые трансформаторы, распределительные устройства, устройства защиты и автоматики составляют электрооборудование *трансформаторной подстанции*.

Основным видом высоковольтных коммутационных аппаратов являются выключатели: масляные, воздушные, электромагнитные, вакуумные и элегазовые, принципиально отличающиеся изоляционной средой и способом гашения дуги.

В *масляных* выключателях гашение дуги происходит за счет интенсивного ее охлаждения в потоках газообразных продуктов разложения масла. Дугогасящее устройство выполнено в виде камер с продольным или поперечным дутьем.

В *многообъемных* выключателях масло служит как для гашения дуги, так и в качестве изоляции.

В малообъемных МВ масло в целях изоляции не применяется, в связи с чем масса их уменьшается, но габариты возрастают по сравнению с многообъемными.

Воздушные выключатели были созданы в Германии в середине 30-х годов с целью экономии минеральных масел; дуга в них гасится воздушным дутьем. Воздушные выключатели наиболее громоздки, сложны и дороги. Основным достоинством масляных и воздушных выключателей является их способность отключать большие токи КЗ.

В *электромагнитных* выключателях электрическая дуга перемещается поперечным магнитным полем и гасится за счет охлаждения в узких щелях дугогасительной камеры с системой магнитного дутья.

В *вакуумных* выключателях гашение электрической дуги происходит за счет ее распада в вакууме дугогасительной камеры; эти выключатели обеспечивают полную взрыво- и пожаробезопасность, имеют малые габариты и массу, высокое быстродействие, но рассчитаны на отключение сравнительно небольших токов КЗ.

Элегаз (электротехнический газ, шестифтористая сера) был предложен в Ленинграде в конце 30-х годов; инертен и нагревостоек, обладает высокой электрической прочностью, что позволяет сократить габариты, увеличить отключающую способность аппаратов и токовую нагрузку. Дугогасительная способность элегаза в несколько раз выше, чем воздуха. В элегазовых выключателях обеспечивается отсутствие срезов тока (т. е. обрыва дуги до перехода тока через нуль) и больших перенапряжений. В отечественной практике для гашения дуги используется перепад давления, создаваемый компрессионным устройством в самой гасительной камере.

К высоковольтным коммутационным аппаратам относятся также разъединители, отделители и короткозамыкатели, выключатели нагрузки.

Основным назначением *разъединителей* является снятие напряжения с участка электрической цепи после ее отключения выключателем. Разъединители, устанавливаемые без выключателей (например, в цепях трансформаторов напряжения, разрядников), служат для отключения небольших токов. Отключать разъединителями ток нагрузки силовых трансформаторов, генераторов, электродвигателей, большинства линий не разрешается.

Короткозамыкатели и *отделители* применяются на стороне высшего напряжения трансформаторов без выключателей; по конструкции это те же разъединители, но с автоматическим приводом. Защита трансформатора действует на короткозамыкатель, который создает короткое замыкание питающей линии, вызывающее срабатывание выключателя на питающей подстанции.

Отделители предназначены для переключения или автоматического отключения трансформаторов ограниченной мощности без нагрузки и различных цепей в бестоковую паузу.

Выключатели нагрузки предназначены для включения и отключения нагрузочных токов цепей, вплоть до номинальных значений, но не способны отключать токи короткого замыкания. Эту функцию выполняют предохранители, включаемые последовательно с силовыми контактами аппарата, или выключатели головных участков.

Конструктивно выключатели нагрузки отличаются от разъединителей наличием маломощного газогенерирующего дугогасительного устройства.

Реакторы предназначены для ограничения тока короткого замыкания в сетях. Их применение позволяет снизить требования к динамической и термической стойкости проводников и аппаратов, облегчить работу элементов электроустановок.

Разрядники (вентильные и трубчатые) служат для защиты оборудования от перенапряжений; *разрядники* состоят из одного или нескольких элементов.

Находят применение также *нелинейные ограничители* перенапряжений (с использованием нелинейных резисторов), снижающие уровень коммутационных и атмосферных перенапряжений более эффективно, чем разрядники.

Трансформаторы напряжения предназначены для питания цепей автоматики, релейной защиты, сигнализации и измерений. Они классифицируются по числу обмоток, фаз, способу охлаждения. Для уменьшения габаритов и массы трансформаторов напряжения, применяемых в электроустановках 110 кВ и выше, используется каскадное (ступенчатое) их исполнение, при котором рабочее напряжение распределяется между каскадами, или включение через емкостный делитель напряжения.

Трансформаторы тока обеспечивают пропорциональную зависимость вторичного тока от первичного при практическом (в пределах так называемой угловой погрешности) совпадении их по фазе.

Изоляторы представляют собой электрокерамические конструкции с металлической арматурой (фланцы, колпаки, штыри и др.), служащей для крепления самих изоляторов и для закрепления на них токоведущих элементов.

Сборные шины РУ предназначены для приема электроэнергии от генераторов электростанции или питающих трансформаторов и распределения ее между отходящими линиями и трансформаторами.

Соединительные шины служат для соединения отдельных аппаратов РУ между собой и присоединения их к сборным шинам. Сборные шины большой длины состоят из секций до 15 м, разделенных гибкими компенсаторами линейного расширения, обусловленного нагревом.

Допустимая температура нагрева принимается равной 70 °С при температуре окружающего воздуха 25 °С (перегрев не более 45 °С). Перегрев шины в месте соединения может привести к его разрыву, возникновению дуги и короткому замыканию между фазами.

Применяются *силовые* и *контрольные* (буква К в начале маркировки) *кабели* с алюминиевыми (буква А в начале) и медными жилами (буквенное обозначение отсутствует). Изоляция жил — бумажная, поливинилхлоридная, полиэтиленовая или резиновая. Изолированные жилы окружаются оболочкой (металл, поливинилхлорид, полиэтилен, резина) и защищаются броней из стальной ленты или проволоки; может применяться защитный антикоррозионный покров. Выбор марки кабеля зависит от места прокладки и условий среды. При температуре окружающего воздуха ниже определенных значений кабели перед прокладкой прогревают (теплым воздухом, током нагрузки). Отдельные участки кабелей соединяют с помощью соединительных муфт. Заделку концов кабеля осуществляют посредством концевых муфт или без применения корпусов муфт заводского изготовления, с помощью различных лент и материалов (концевая заделка). Заземляют кабель медным многожильным проводом, длина которого должна быть достаточна для присоединения его к оболочкам (экранам), броне и металлическим корпусам муфт (опорным конструкциям, сети заземления).

1. Подготовительные работы при наладке распределительных устройств

1.1. Работа с документацией.

До начала работ следует:

- изучить электрическую часть проекта;
- убедиться в соответствии установленного электрооборудования проекту, ознакомиться с технической документацией предприятий-изготовителей;
- получить от заказчика согласованные с соответствующими службами энергосистемы уставки реле защит;
- проверить соответствие установленных реле проекту и заданным уставкам, провести поверочный расчет уставок;
- передать заказчику замечания по проекту;
- проверить правильность ревизии и регулировки механической части коммутационных аппаратов, руководствуясь инструкциями по их монтажу и эксплуатации;
- подготовить соответствующую аппаратуру, испытательное оборудование, приспособления и комплект форм протоколов.

1.2. Внешний осмотр:

- обратить внимание на чистоту и освещенность помещений и территории РУ, наличие свободного прохода, исправность строительных конструкций, дверей и замков, наличие и четкость надписей на отдельных камерах и дверях;
- проверить наличие пломб, целостность кожухов, состояние уплотнений, винтов или шпилек у оборудования;
- убедиться в отсутствии видимых повреждений и следов коррозии, надежности болтовых соединений, в соответствии электромагнитов управления и реле прямого действия номинальному напряжению оперативного тока и заданным уставкам, проверить легкость хода и отсутствие затираний подвижной системы при включении и отключении коммутационной аппаратуры;
- проверить наличие и целость заземлений открытых проводящих частей.

2. Испытание электрической изоляции

Испытание электрической изоляции является наиболее общей операцией для всех видов электрооборудования линий.

2.1. Характеристики изоляции как диэлектрика.

Изоляция характеризуется в основном сопротивлением постоянному току, диэлектрическими потерями и электрической прочностью. Электрическая схема замещения изоляции может быть представлена параллельным соединением конденсаторов и резисторов. В связи с этим при приложении к изоляции постоянного напряжения ток в ней уменьшается по экспоненте и, соответственно, возрастает измеряемое значение сопротивления. Установившееся значение *сопротивления изоляции* $R_{из}$ характеризует наружное загрязнение изоляции и наличие в ней путей сквозной утечки тока. Кроме того, увлажнение изоляции может характеризоваться также абсолютным значением емкости и динамикой ее изменения.

2.2. Измерение сопротивления изоляции постоянному току.

Сопротивление изоляции практически во всех случаях измеряется мегаомметрами — приборами, состоящими из источника постоянного (выпрямленного) тока, измерительной системы и добавочных резисторов.

В электромеханических приборах источником питания служит электромашинный генератор, приводимый во вращение рукояткой; измерительная система выполнена в виде магнитоэлектрического логометра. В других типах мегаомметров в качестве измерительного элемента используется вольтметр, фиксирующий падение напряжения на образцовом резисторе от тока в измеряемом сопротивлении. Измерительная система электронных мегаомметров строится на двух операционных усилителях с логарифмической характеристикой, выходной ток одного из которых определяется током объекта, а другого — падением напряжения на нем.

Измерительный прибор включается на разность этих токов, а шкала выполняется в логарифмическом масштабе, что дает возможность градуировать ее в единицах сопротивления. Результат измерения мегаомметрами всех этих систем практически не зависит от напряжения. Однако в некоторых случаях (испытание изоляции, измерение коэффициента абсорбции) следует учитывать, что при малых сопротивлениях изоляции напряжение на зажимах мегаомметра может быть существенно ниже номинального из-за высокого сопротивления ограничивающего резистора, служащего для защиты источника питания от перегрузки. Выходное сопротивление мегаомметра и истинное значение напряжения на объекте можно рассчитать, зная ток короткого замыкания прибора, в частности: 0,5 для мегаомметров типа Ф4102; 1,0 — для Ф4108 и 0,3 мА — для ЭС0202.

2.3. Измерение показателя диэлектрических потерь.

При переменном напряжении в изоляции протекает ток, опережающий по фазе приложенное напряжение на угол φ (рис. 1), меньший 90 град. эл. на небольшой угол δ , обусловленный наличием активного сопротивления.

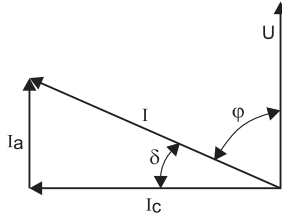


Рис. 1. Векторная диаграмма токов через диэлектрик с потерями: U — напряжение на диэлектрике; I — полный ток через диэлектрик; I_a , I_c — соответственно активная и емкостная составляющие полного тока; φ — угол фазного сдвига между приложенным напряжением и полным током; δ — угол между полным током и его емкостной составляющей

Отношение активной составляющей тока I_a к емкостной составляющей I_c называется тангенсом угла *диэлектрических потерь* и выражается в процентах:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} 100 \text{ \%}.$$

В идеальном диэлектрике без потерь угол $\delta = 0$ и, соответственно, $\operatorname{tg} \delta = 0$. Увлажнение и другие дефекты изоляции вызывают увеличение активной составляющей тока диэлектрических потерь и $\operatorname{tg} \delta$. Поскольку при этом активная составляющая растет значительно быстрее, чем емкостная, показатель $\operatorname{tg} \delta$ отражает изменение состояния изоляции и потери в ней. При малом объеме изоляции удастся обнаружить развитые местные и сосредоточенные дефекты. Местные дефекты, обусловленные сквозными проводящими мостиками, лучше обнаруживаются измерением сопротивления изоляции на постоянном токе.

Измерение $\operatorname{tg} \delta$ производят мостами переменного тока типов МД-16, Р5026 (Р5026М) или Р595, которые являются по существу измерителями емкости (мост Шеринга); принципиальная схема моста приведена на рис. 2. В этой схеме определяются параметры изоляционной конструкции, соответствующие схеме замещения с последовательным соединением конденсатора без потерь C и резистора R , для которой

$$\operatorname{tg} \delta = \omega RC,$$

где ω — угловая частота сети.

Процесс измерения заключается в уравнивании (балансировке) мостовой схемы поочередной регулировкой сопротивления резистора и емкости магазина конденсаторов. При равновесии моста, которое индицируется измерительным прибором P , выполняется равенство.

Если значение емкости C выразить в микрофарадах, то при промышленной частоте сети $f = 50$ Гц будем иметь $\omega = 2\pi f = 100\pi$ и, следовательно, $\operatorname{tg} \delta \% = 0,01\pi RC$.

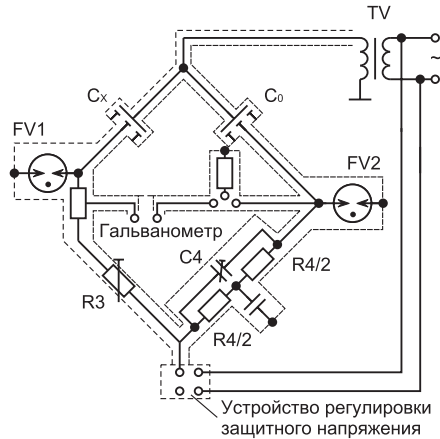


Рис. 2. Принципиальная схема моста Р 525

Измерение возможно на напряжение до 1 кВ и выше 1 кВ (3—10 кВ) в зависимости от класса изоляции и емкости объекта. В качестве источника питания может служить измерительный трансформатор напряжения. Мост используется с внешним воздушным конденсатором C_0 . Принципиальная схема включения аппаратуры при измерении $\text{tg } \delta$ показана на рис. 3.

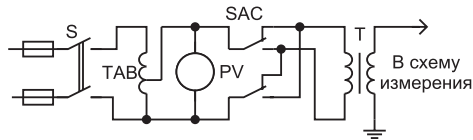


Рис. 3. Схема включения испытательного трансформатора при измерении $\text{tg } \delta$: S — рубильник; TAB — регулировочный автотрансформатор; SAC — переключатель полярности выводов испытательного трансформатор T

Применяют две схемы включения моста: так называемую нормальную, или прямую (рис. 3а), в которой измерительный элемент P включен между одним из электродов испытуемой изоляционной конструкции и землей, и перевернутую (рис. 3б), где он включен между электродом испытуемого объекта и выводом высокого напряжения моста. Нормальную схему применяют, когда оба электрода изолированы от земли, перевернутую — когда один из электродов наглухо соединен с землей.

Необходимо помнить, что в последнем случае отдельные элементы моста будут находиться под полным испытательным напряжением.

Измерение возможно на напряжении до 1 кВ и выше 1 кВ (3—10 кВ) в зависимости от класса изоляции и емкости объекта. В качестве источника питания может служить измерительный трансформатор напряжения. Мост используется с внешним образцовым воздушным конденсатором (C_N на рис. 2).

Мост и необходимую аппаратуру размещают в непосредственной близости к испытуемому объекту и устанавливают ограждение (рис. 4).

Провод, идущий от испытательного трансформатора T к образцовому конденсатору C, а также соединительные кабели моста P, находящиеся под на-

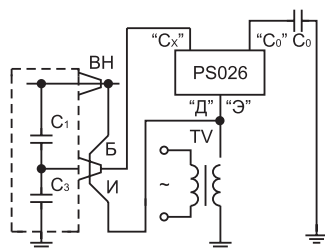


Рис. 4. Схема экранирования при измерении характеристик изоляции наружных слоев изоляции ввода: C_1 — основная изоляция; C_2 — изоляция наружных слоев; ВН — вывод высокого напряжения; И — измерительный вывод; Б — бандаж; TV — испытательный трансформатор; C_0 — образцовый конденсатор

пряжением, должны быть удалены от заземленных предметов не менее чем на 100—150 мм. Трансформатор Т и его регулировочное устройство ТАВ (ЛАТР) должны отстоять от моста не менее чем на 0,5 м. Корпуса моста, трансформатора и регулирующего устройства, а также один вывод вторичной обмотки трансформатора обязательно заземляют.

Показатель $\operatorname{tg} \delta$ часто измеряется в зоне действующего РУ, а, поскольку между объектом испытания и элементами РУ всегда имеется емкостная связь, через испытуемый объект протекает ток влияния. Этот ток, зависящий от напряжения и фазы влияющего напряжения и суммарной емкости связи, может привести к неправильной оценке состояния изоляции, особенно объектов небольшой емкости, в частности вводов (до 1000—2000 пФ). Различают электростатические и электромагнитные влияния электрического поля.

Электромагнитные влияния исключаются полным экранированием (см. рис. 4). Измерительные элементы размещают в металлическом корпусе (например, мосты P5026 и P595).

Электростатические влияния создаются находящимися под напряжением частями РУ и ЛЭП. Вектор влияющего напряжения может занимать любое положение по отношению к вектору испытательного напряжения.

Известны несколько способов уменьшения влияния электростатических полей на результаты измерения $\operatorname{tg} \delta$:

- отключение напряжения, создающего влияющее поле. Этот способ наиболее эффективен, но не всегда применим по условиям энергоснабжения потребителей;
- вывод объекта испытания из зоны влияния. Цель достигается, но транспортировка объекта нежелательна и не всегда возможна;
- измерение на частоте, отличной от 50 Гц. Применяется редко, так как требует специальной аппаратуры;
- метод компенсации влияний, при котором достигается совмещение векторов испытательного напряжения и ЭДС влияющего поля. С этой целью в цепь регулирования напряжения включают фазорегулятор и при отключенном объекте испытания добиваются равновесия моста. При отсутствии фазорегулятора эффективной мерой может явиться питание моста от того напряжения трехфазной системы (с учетом полярности), при котором результат измерения будет минимальным. Часто бывает

достаточно выполнить измерение четыре раза при разных полярностях испытательного напряжения и подключении гальванометра моста;

- расчетные методы исключения погрешности. Применяются как самостоятельно, так и для уточнения результатов, полученных другими методами.

2.4. Испытание изоляции повышенным напряжением

Электрическая прочность изоляции определяется ее способностью длительно выдерживать рабочее напряжение.

Уменьшение электрической прочности вызывается в большинстве случаев увлажнением и местными дефектами изоляции. Обычно такими дефектами являются газовые (воздушные) включения в твердом или жидком диэлектрике. За счет того, что электрическая прочность газа во включении ниже, чем у основной изоляции, создаются условия для возникновения пробоя или перекрытия изоляции в месте дефекта — *частичного* разряда. В свою очередь, частичные разряды вызывают дальнейшее разрушение изоляции. Частичным разрядом называют как скользящий (поверхностный) разряд, так и пробой отдельных зон или элементов изоляции.

Для определения запаса электрической прочности изоляции производится испытание ее повышенным напряжением. Испытательное напряжение, значительно превышающее рабочее, прикладывается в течение времени, достаточного для развития разряда в местном дефекте вплоть до пробоя. Таким образом, приложение повышенного напряжения позволяет не только выявить дефекты, но и гарантировать необходимый уровень электрической прочности изоляции в период ее эксплуатации.

Испытание повышенным напряжением переменного тока промышленной частоты производится посредством повышающего трансформатора с регулировочным устройством на стороне низшего напряжения. Схема установки должна содержать также выключатель питания с видимым разрывом и максимальную токовую защиту для отключения питания трансформатора при пробое или перекрытии изоляции объекта, например рубильник и предохранитель или автоматический выключатель со снятой крышкой. Уставка срабатывания защиты должна превышать ток, потребляемый из сети при максимальном значении испытательного напряжения на объекте, не более чем в два раза.

Испытательный трансформатор выбирается по мощности в зависимости от предполагаемой нагрузки его током емкости объекта и допустимого нагрева обмоток. Номинальную мощность трансформатора можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{ном}} = I_{\text{исп}} U_{\text{ном}} = \omega C U_{\text{исп}} U_{\text{ном}},$$

где $P_{\text{ном}}$ — номинальная мощность испытательного трансформатора, кВ · А; $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение, кВ; $U_{\text{ном}}$ — номинальное напряжение обмотки ВН трансформатора, кВ; ω — угловая частота испытательного напряжения, рад/с; C — емкость изоляции объекта, пФ.

В качестве таких трансформаторов можно, кроме специальных (например, типа ИОМ), использовать высоковольтные трансформаторы от испытатель-

ных (например, типа АИИ, АИМ и др.) и производственных установок, а также силовые трансформаторы небольшой мощности и измерительные трансформаторы напряжения. Как правило, приемо-сдаточным испытаниям подвергается оборудование напряжением до 35 кВ. При более высоком напряжении требуются громоздкие испытательные установки, наличие которых, как и возможность их транспортировки, определяет возможность проведения испытаний. Так, например, испытательные трансформаторы типа ИОМ на напряжение 100—300 кВ имеют массу от 0,17 до 7,7 т, типа ИОМН (до 100 кВ) — 0,28 т, ТВО (100 кВ) — 0,15 т.

Широко применяются измерительные трансформаторы напряжения типа НОМ. Их максимальная мощность, указываемая в паспортных данных и обусловленная обеспечением соответствующего класса точности, сравнительно невелика. Однако по условиям нагрева они допускают кратковременную перегрузку от 3- до 5-кратной по отношению к значению тока, вычисленному по максимальной паспортной мощности. Кроме того, эти трансформаторы могут быть перевозбуждены по напряжению на 30—50 %; можно включить два трансформатора последовательно (рис. 5).

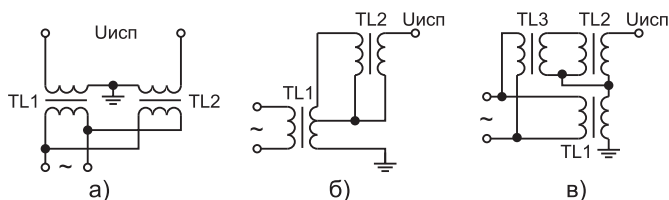


Рис. 5. Схемы последовательного включения испытательных трансформаторов: TL1 и TL2 — испытательные трансформаторы; TL3 — изолирующий трансформатор

Включение двух трансформаторов по схеме рис. 5а применимо в случае, когда оба электрода объекта могут быть изолированы от земли.

Испытательное напряжение равно сумме напряжений обоих трансформаторов; номинальные значения этих напряжений могут быть различными.

При каскадном соединении трансформаторов (рис. 5а, б) один из них TL2 находится под высоким потенциалом и корпус его должен быть изолирован от земли. Возбуждение этого трансформатора может производиться с помощью специальной обмотки первого трансформатора TL1 каскада (рис. 5б) или непосредственно от его вторичной обмотки, если максимальное значение напряжения на ней не превысит допустимого для первичной обмотки трансформатора TL2. Если надежно изолировать трансформатор TL2 не представляется возможным, используют вспомогательный изолирующий трансформатор TL3 (рис. 5в).

Силовые трансформаторы применяются с получением фазного или линейного напряжения. В первом случае нейтраль обмотки ВН заземляется, а первичное напряжение подается на нуль и соответствующий фазный вывод обмотки НН; мощность трансформатора принимается при этом равной 1/3 номинальной. Линейное напряжение используется при условии, что изоляция нейтрали рассчитана на полное фазное напряжение. В этом случае один или два соединенных между собой вывода ВН заземляются; мощность трансфор-

матора принимается равной $2/3$ номинальной. Силовые трансформаторы допускают кратковременную перегрузку по току в $2,5\text{--}3$ раза.

Регулировочное устройство должно обеспечивать изменение напряжения трансформатора от $25\text{--}30\%$ до полного значения испытательного напряжения. Регулирование должно быть практически плавным, со ступенями, не превышающими $1\text{--}1,5\%$ от испытательного напряжения.

Разрывы цепи при регулировании недопустимы. Напряжение должно быть близко к синусоидальному с содержанием высших гармонических не более 5% . При использовании регуляторов с малым внутренним сопротивлением, например автотрансформаторов, это требование практически выполняется; применение дросселей или реостатов для этой цели не рекомендуется.

Измерение испытательного напряжения производится обычно на стороне НН. В этом случае необходима предварительная градуировка прибора или расчетное исключение погрешности от падения напряжения на сопротивлении рассеяния испытательного трансформатора по следующей формуле:

$$U = \frac{U_{\text{исп}}}{K} \left(1 - \frac{u}{100} \frac{m}{n} \right) 10^3,$$

где U — напряжение на первичной (НН) обмотке трансформатора, В; $U_{\text{исп}}$ — испытательное напряжение, кВ; K — коэффициент трансформации испытательного трансформатора; u_k — напряжение короткого замыкания трансформатора; $m = \frac{I_{\text{исп}}}{I_{\text{ном}}}$ — отношение тока обмотки ВН к номинальному току;

$n = \frac{U_{\text{исп}}}{U_{\text{ном}}}$ — отношение испытательного напряжения к номинальному напряжению вторичной обмотки.

Необходимо учитывать, что сопротивление рассеяния имеет индуктивный характер и протекание по нему тока при емкостном характере нагрузки вызывает повышение испытательного напряжения, не учитываемое пересчетом по коэффициенту трансформации. В более ответственных случаях (крупные электрические машины) напряжение измеряется на стороне ВН киловольтметрами, вольтметрами с делителями напряжения или на отпайках обмотки ВН (если они имеются) с помощью трансформаторов напряжения или шаровых разрядников.

Нормируется и подлежит измерению действующее значение испытательного напряжения. При практически синусоидальном напряжении и соответствующей градуировке могут быть использованы также устройства для измерения среднего и амплитудного значений. Суммарное значение относительной погрешности измерения не должно превышать 5% . Рекомендуется применение средств измерений с основной погрешностью не более 3% . Приборы с нормируемым приведенным значением погрешности (например, стрелочные) должны иметь основную погрешность не более $1,5\%$ (класс точности 1,5).

Для испытания повышенным напряжением постоянного тока установка дополняется высоковольтным выпрямителем.

3. Масляные выключатели (МВ)

3.1. Краткие сведения

3.1.1. Типы МВ.

Выключатель ВМГ-133 (выключатель масляный, малообъемный, горшковый) предназначен для внутренней установки. Подвижный контакт — стержневой, неподвижный — розеточного типа. Взамен ВМГ-133 был выпущен выключатель ВМГ-10.

Выключатели ВМП (выключатель масляный подвесной) выпускаются на напряжение до 35 кВ в исполнениях для КСО и КРУ. Выключатель малообъемный, подвижный контакт — стержневой, неподвижный — розеточный.

Выключатели МГГ и МГ (выключатель масляный горшковый) — малообъемные, на большие номинальные токи, имеют два параллельных токоведущих контура: главный и дугогасительный. При включенном положении выключателя оба контура работают параллельно, причем преобладающая часть тока проходит через главный контур, имеющий меньшее сопротивление. При отключении выключателя контакты главного контура размыкаются раньше контактов дугогасительного.

Выключатель МГ-35 состоит из трех вертикально расположенных полюсов на одной раме, где закреплены также общий для полюсов приводной механизм и коробки для трансформаторов тока, по два на полюс.

Выключатели ВМК (выключатель маломасляный колонковый) выпускаются на напряжение 35—220 кВ. Дугогасительное устройство прикреплено к верхнему фланцу, контактные стержни проходят в него снизу вверх. Управление выключателем осуществляется встроенным пневматическим приводом, расположенным у основания.

Выключатели МКП, Урал (У) и С (многообъемные масляные выключатели) на напряжение 35 кВ выпускаются в виде трехполюсных аппаратов, каждый полюс которых собран на отдельной крышке и помещен в отдельный бак. Выключатель и привод смонтированы на общем каркасе, к которому крепится лебедка для подъема и опускания баков с маслом.

Выключатели на 110 и 220 кВ выпускаются в виде отдельных полюсов (баков). Все эти выключатели имеют встроенные трансформаторы тока — от двух до четырех на каждый полюс.

3.1.2. Приводы к выключателям.

Электромагнитные приводы. Тяговая характеристика соответствует характеристике противодействующих сил МВ. Требуется наличие мощного источника постоянного (или выпрямленного) тока. Сечение подводящих кабелей, выбираемое по условию падения напряжения, получается значительным. Из-за большой индуктивности обмоток электромагнитов время

включения велико (до 1 с). Выпускаются и электромагнитные приводы на переменном токе; применяются преимущественно для выключателей небольшой мощности.

Пружинный привод. Энергия, необходимая для включения, запасается в мощной пружине, которая заводится либо от руки, либо с помощью двигателя малой мощности (до 1 кВт). Тяговое усилие уменьшается к концу хода включения вследствие уменьшения деформации пружин. Быстродействие привода позволяет осуществлять циклы АПВ (автоматическое повторное включение) и АВР (автоматическое включение резерва). Конструктивным преимуществом привода является отсутствие мощного источника постоянного тока, резервуаров со сжатым газом, клапанов и пневматического хозяйства. Недостаток — возможность применения только для сравнительно небольших малообъемных выключателей до 110 кВ.

Пневматический привод. Энергия запасается в резервуаре со сжатым воздухом, который приводит в движение поршень в цилиндре. Расход воздуха позволяет проводить 5—6 операций включения без подкачки. Тяговое усилие возрастает практически мгновенно и изменяется мало; тяговая характеристика может корректироваться. Малое время включения дает возможность использовать привод для самых мощных выключателей. Недостаток — необходимость принятия специальных мер для обеспечения нормальной работы при низких температурах.

Пневмогидравлический привод. Аккумуляция энергии, необходимой для включения, осуществляется за счет сжатия газа (обычно азота). Применение гидравлики позволяет значительно облегчить подвижную часть выключателя и получить компактный механизм. Время включения может быть меньше, чем у пневматических приводов. Привод позволяет легко осуществить ручное включение. Температурный диапазон нормальной работы практически не ограничен.

При определенных условиях могут применяться ручные приводы, осуществляющие включение и отключение выключателя воздействием руки на рычаг или маховик привода; кроме того, отключение может быть автоматическим или дистанционным.

Полностью собранный и отреvizованный МВ проверяется монтажным персоналом на одновременность замыкания и размыкания контактов, измеряется ход подвижной части, вжим и ход контактов.

3.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) первичных цепей. Мегаомметром на 2500 В измеряется сопротивление изоляции подвижных и направляющих частей, выполненных из органических материалов. Измерение производится поочередно для каждой фазы при двух других заземленных. Кроме того, следует измерить сопротивление изоляции контактного разрыва поочередно для каждой фазы при заземлении всех трех вторых полюсов.

Значение сопротивления изоляции не должно быть менее 1000 МОм для МВ на номинальное напряжение 3—10 кВ и 3000 МОм — для МВ на напряжение 15—150 кВ.

Первое измерение производится обычно при включенном положении МВ. В этом случае общее сопротивление изоляции выключателя $R_{\text{МВ}}$ представляется параллельным соединением сопротивления изоляции $R_{\text{пч}}$ подвижных частей и сопротивления изоляции $R_{\text{от}}$ отключенного МВ. Если измеренные значения сопротивления изоляции окажутся ниже нормированных, производится аналогичное измерение при отключенном МВ и рассчитывается сопротивление изоляции подвижных частей по формуле:

$$R_{\text{п}} = \frac{R_{\text{МВ}} R_{\text{от}}}{R_{\text{от}} - R_{\text{МВ}}}.$$

Если и это значение будет ниже нормы, следует проверить состояние изоляции ошиновки, а при ее исправности произвести ревизию МВ, обращая особое внимание на штанги и траверсы из органических материалов.

При сравнении полученных результатов с нормами рекомендуется предусматривать некоторый запас, имея в виду возможное снижение сопротивления изоляции в зависимости от погодных условий, температуры и др.;

б) вторичных цепей, электромагнитов включения и отключения и т. п. Испытывается каждое присоединение вторичных цепей и цепей питания приводов выключателей совместно со всеми присоединенными аппаратами (обмотки электромагнитов, контакторы, реле, приборы, вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения и т. п.). Измерение производится мегаомметром на 500—1000 В, сопротивление изоляции должно быть не ниже 1 МОм.

3.3. Испытание вводов

3.3.1. Внешний осмотр.

При внешнем осмотре вводов проверяются:

- армировочные швы — на отсутствие трещин и выкрашиваний, через которые может проникнуть заливочная масса ввода;
- нижняя часть конденсаторной втулки — на отсутствие царапин и повреждений лакового покрова;
- фарфоровая крышка — на отсутствие трещин и сколов.

3.3.2. Измерение сопротивления изоляции.

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ у вводов с бумажно-масляной изоляцией. Измеряется сопротивление изоляции измерительной и последней обкладок вводов относительно соединительной втулки, которую заземляют. Сопротивление изоляции должно быть не менее 1000 МОм.

3.3.3. Измерение $\text{tg } \delta$ и емкости изоляции.

Является основным методом контроля состояния органической изоляции. Производится для основной изоляции вводов при напряжении 10 кВ и изоляции измерительного конденсатора ПИН (C_2) и/или последних слоев изоляции (C_3) при напряжении 5 кВ. Показатель $\text{tg } \delta$ не должен превышать значений, указанных в табл. 1.

Таблица 1. Наибольшие допустимые значения $\operatorname{tg} \delta$ основной изоляции и изоляции измерительного конденсатора вводов при температуре 20 °С

| Тип и зона изоляции ввода | Предельные значения $\operatorname{tg} \delta$ (%) для вводов номинальным напряжением, кВ | |
|---|---|--------------------|
| | 35 | 110—150 |
| Бумажно-масляная изоляция ввода: — основная изоляция (C_1) и изоляция конденсатора ПИН (C_2); — последние слои изоляции (C_3) | — — | 0,7/1,5 1,2/3,0 |
| Твердая изоляция ввода с масляным заполнением: — основная изоляция (C_1) | 1,0/1,5 | 1,0/1,5 |
| Бумажно-бакелитовая изоляция ввода с мастичным заполнением: — основная изоляция (C_1) | 3,0/9,0 | — |

Примечание. В числителе указаны значения $\operatorname{tg} \delta$ изоляции при вводе в эксплуатацию, в знаменателе — в эксплуатации.

Некоторые вводы оборудуются потенциометрическим устройством и изолированными выводами для подключения прибора измерения напряжения (ПИН). Они содержат дополнительную емкость C_2 в виде цилиндрического бумажно-масляного конденсатора, намотанного на основной изоляционный остов ввода. Одна обкладка этого конденсатора заземлена (через соединительную втулку ввода), а вторая соединена с изолированным выводом, расположенным рядом с выводом для измерения $\operatorname{tg} \delta$ основной изоляции ввода. Емкостная схема замещения изоляции в этом случае представляет собой последовательное соединение емкости C_1 основного конденсатора между токоведущим стержнем и измерительным выводом, C_2 измерительного конденсатора между измерительным выводом и соединительной втулкой — фланцем (или между последней обкладкой и соединительной втулкой) и емкости C_3 между последней обкладкой и измерительным выводом. Отношение значений емкости C_2/C_1 регламентируется в зависимости от класса изоляции ввода и для 110 кВ, например, равно 16. Ориентировочное значение основной емкости C_1 для вводов на 110 кВ с бумажно-масляной изоляцией составляет 340—500 пФ. Значения емкости C_3 не нормируются и могут быть самыми различными, от нескольких сотен до нескольких тысяч пикофард; вывод C_3 служит для обеспечения измерения емкости C_1 . У вводов с ПИН отдельно находят $\operatorname{tg} \delta$ изоляции основной и измерительной обкладок. В условном обозначении ввода наличие ПИН указывается буквой П.

У трехзажимных вводов $\operatorname{tg} \delta$ изоляции отводов должен быть не более 2,5 %. Предельное увеличение емкости основной изоляции составляет 5 % относительно измеренной на заводе-изготовителе. Браковочные нормы по значению $\operatorname{tg} \delta$ для изоляции измерительного конденсатора те же, что и основной изоляции. Нормируются значения, приведенные к температуре 20 °С в соответствии с инструкцией по эксплуатации ввода.

Для устранения поверхностных утечек тока на изоляцию накладывают охранный кольцо, соединяемое с экраном моста. В этом случае поверхностный ток утечки отводится непосредственно в землю и не влияет на результат изме-

рения. Охранное кольцо делается из двух витков неизолированного провода и плотно накладывается на поверхность изоляторов вблизи соответствующего электрода.

3.3.4. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание является обязательным для вводов на напряжении до 35 кВ. Значение испытательного напряжения для вводов, испытываемых отдельно или после установки в РУ на выключатель, принимается согласно табл. 2.

Таблица 2. Испытательное напряжение промышленной частоты для вводов

| Номинальное напряжение, кВ | Испытательное напряжение, кВ | | |
|----------------------------|---|---|---|
| | Керамические изоляторы, испытываемые отдельно | Аппаратные вводы с основной керамической или жидкой изоляцией | Аппаратные вводы с основной бакелитовой изоляцией |
| 3 | 25 | 24 | 21,6 |
| 6 | 32 | 32 | 28,8 |
| 10 | 42 | 42 | 37,8 |
| 15 | 57 | 55 | 49,5 |
| 20 | 68 | 65 | 58,5 |
| 35 | 100 | 95 | 85,5 |

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения для вводов 1 мин.

Ввод считается выдержавшим испытание, если при этом не наблюдалось пробоя, перекрытия, скользящих разрядов и частичных разрядов в масле (у маслонаполненных вводов), выделений газа, а также если после испытания не обнаружено местного перегрева изоляции.

Перед испытаниями следует убедиться в надлежащем состоянии изоляционных частей (отсутствие загрязнений, увлажнения, шин, особенно у фарфора), отсутствии течи масла и проконтролировать его уровень по указателю.

3.4. Оценка состояния внутрибаковой изоляции и изоляции дугогасительных устройств

Производится для выключателей 35 кВ в том случае, если при измерении tg δ вводов на полностью собранном выключателе получены повышенные значения по сравнению с нормами в табл. 1. Внутрибаковая изоляция и изоляция дугогасительных устройств подлежит сушке, если исключение влияния этой изоляции снижает измеренное (абсолютное) значение tg δ более чем на 4 %.

3.5. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции выключателей относительно корпуса или опорной изоляции. Производится для выключателей напряжением до 35 кВ (см. табл. 3). Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин.

Аналогично испытывается изоляция межконтактных разрывов выключателей 6—10 кВ.

Таблица 3. Испытательное напряжение промышленной частоты для внешней изоляции аппаратов

| Класс напряжения, кВ | Испытательное напряжение, кВ, для аппаратов с изоляцией | | | |
|----------------------|---|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | нормальной керамической | нормальной органической | облегченной керамической | облегченной органической |
| 3 | 24 | 21,6 | 13 | 11,7 |
| 6 | 32 | 28,8 | 21 | 18,9 |
| 10 | 42 | 37,8 | 32 | 28,8 |
| 15 | 55 | 49,5 | 48 | 43,2 |
| 20 | 65 | 58,5 | — | — |
| 35 | 95 | 85,5 | — | — |

При испытании опорной изоляции повышенное напряжение подводят поочередно к каждой фазе и корпусу включенного выключателя.

Для малообъемных масляных выключателей напряжение прикладывается поочередно к каждой фазе отключенного аппарата. Вторые полюса должны быть соединены между собой и заземлены;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов включения и отключения. Значение испытательного напряжения 1 кВ. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин. Перед началом испытания необходимо:

- убедиться в отсутствии напряжения на испытываемых цепях;
- отсоединить всю аппаратуру, которая не допускает приложения повышенного напряжения;
- принять меры для исключения попадания повышенного напряжения на другие схемы;
- напряжение поднимать плавно, наблюдая за отсутствием искрения, потрескиваний и т. п.

До и после испытания необходимо измерить сопротивление изоляции мегаомметром на 2500 В для п. «а»), на 500—1000 В для п. «б»). За время испытания значение сопротивления не должно снизиться.

3.6. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактов МВ. Измеряется сопротивление токоведущей системы полюса выключателя и отдельных его элементов. Так, если выключатель содержит две пары главных контактов на фазу и дугогасительные контакты, то измеряют сопротивление каждой пары рабочих (главных) контактов и отдельно — дугогасительных контактов. В последнем случае между рабочими контактами вставляют изолирующие прокладки.

Измерения выполняют микроомметром (например, типа Ф-415, М-246 и др.), двойным мостом или методом амперметра—милливольтметра по четырехзажимной схеме (рис. 6). Перед измерением рекомендуется произвести

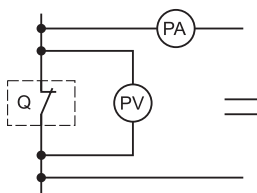


Рис. 6. Схема измерения сопротивления постоянному току контактов МВ методом амперметра-милливольтметра: Q — выключатель в положении «включено»; PA — амперметр; PV — милливольтметр

5—7 раз включение и отключение МВ, в результате чего поверхности контактов самоочищаются и их переходное сопротивление уменьшается.

Значение сопротивления контактов постоянному току должно соответствовать данным предприятия-изготовителя; для наиболее распространенных типов МВ они приведены в табл. 4.

Таблица 4. Предельные значения сопротивления постоянному току контактов масляных выключателей

| Тип выключателя | Номинальный ток, А | Сопротивление контактов фазы, мкОм | |
|-----------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | всей контактной системы | дугогасительных контактов |
| ВПМ-10 | 630 | 78 | |
| | 1000 | 72 | |
| МГ-10 | 5000 | 10 | 300 |
| МГГ-10 | 3150 | 18 | 240 |
| | 4000 | 14 | 240 |
| | 5000 | 12 | 240 |
| ВМ-14, ВМ-16 | 200 | 350 | |
| | 600 | 150 | |
| | 1000, 1250 | 100 | |
| ВМ-22, ВМ-23 | 600 | 150 | |
| | 1000, 1500 | 100 | |
| ВМГ-133 | 600 | 100 | |
| | 1000 | 75 | |
| ВМГ-10 | 630 | 75 | |
| | 1000 | 70 | |
| ВМП-10 | 630 | 78 | |
| | 1000 | 72 | |
| ВМПЭ-10 | 630 | 50 | |
| | 1000 | 40 | |
| | 1600 | 30 | |

Продолжение табл. 4

| Тип выключателя | Номинальный ток, А | Сопротивление контактов фазы, мкОм | |
|----------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------|
| | | всей контактной системы | дугогасительных контактов |
| ВМПП-10 | 630 | 55 | |
| | 1000 | 45 | |
| | 1600 | 32 | |
| ВМП-10, ВМП-10П | 600 | 55 | |
| | 1000 | 40 | |
| | 1500 | 30 | |
| ВММ-10 | 630 | 85 | |
| С-35 | 630 | 310 | 9 |
| | 3200 | 60 | 14 |
| МКП-35 | 1000 | 250 | |
| МГ-35 | 600 | 400 | |
| ВМ-35, ВМД-35, ВБ-35 | 600 | 410 | |
| МКП-110Б | 630 | 1300 | |
| | 1000 | 800 | |
| У-110-20-40(50) | 2000 | 320 (365) | |

б) шунтирующих резисторов дугогасительных устройств. Измеренное значение сопротивления не должно отличаться от заводских данных более чем на 3 %;

в) обмоток электромагнитов включения и отключения, значения сопротивления которых должны соответствовать данным предприятий-изготовителей. Измерение производят омметрами любого типа.

3.7. Измерение скоростных и временных характеристик выключателей

Измеряются скорости движения подвижных контактов МВ и время их включения и отключения при полностью залитом маслом выключателе и номинальном напряжении оперативного тока на выводах электромагнитов управления. Скорость движения подвижных частей выключателя характеризует качество регулировки аппарата и привода. Большая скорость может вызвать чрезмерные ударные механические нагрузки, малая может привести к вибрации и снижению отключающей способности выключателя. Увеличение (уменьшение) времени включения или отключения свидетельствует об ослаблении (перетяжке) пружин и требует дополнительной регулировки МВ.

3.7.1. Измерение скорости движения контактов (контактной траверсы) при включении и отключении МВ.

Наиболее широко распространен метод измерения скорости с помощью вибрационного отметчика времени — вибрографа, представляющего собой

электромагнит переменного тока, на якоре которого закреплен пишущий узел (графитовый стержень). При подключении обмотки электромагнита на напряжение с частотой 50 Гц стержень будет совершать 100 колебаний за 1 с. Против графитового стержня на подвижной части выключателя крепят рейку с бумажной лентой. Вибратор устанавливается таким образом, чтобы колебания стержня совершались в плоскости, перпендикулярной движению ленты. В результате при включении (отключении) МВ на ленте вычерчивается волнообразная кривая, называемая виброграммой (рис. 7).

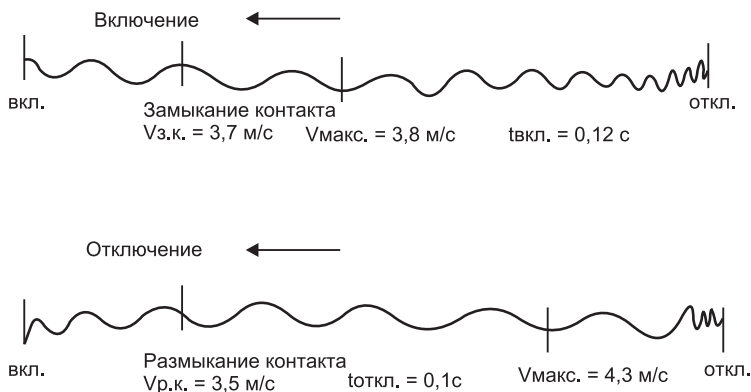


Рис. 7. Виброграмма выключателя (тип ВМП-10): $V_{з.к.}$, $V_{р.к.}$ — скорость замыкания (размыкания) контактов; $V_{макс}$ — максимальная скорость; $t_{вкл.}$, $t_{откл.}$ — полное время включения (отключения)

Вертикальные линии в начале и конце виброграммы соответствуют неподвижному (включенному или отключенному) положению МВ. Ход подвижных частей определяется непосредственным измерением длины участков виброграммы; полная ее длина равна полному ходу траверсы.

Поскольку расстояние между вершинами любой пары соседних волн траверса проходит за одно и то же время 0,01 с, это расстояние, выраженное в сантиметрах, численно равно среднему значению скорости на данном отрезке пути в метрах в секунду. Наиболее «растянутая» часть виброграммы соответствует, таким образом, максимальной скорости $V_{макс}$. Другими характерными точками являются значения скорости в моменты замыкания и размыкания контактов ($V_{з.к.}$, $V_{р.к.}$).

Время прохождения любого участка пути, в том числе полного хода траверсы при включении и отключении ($t_{вкл.}$, $t_{откл.}$), время движения в контактах и т. п. подсчитывается по числу волн на выбранном участке. По 6—8 значениям скорости, среди которых обязательно должны быть значения ее вблизи характерных точек (на рис. 7 отмечены вертикальными линиями), можно построить непрерывную кривую изменения скорости движения в функции пути $V(L)$ при включении и отключении МВ (рис. 8).

При анализе виброграммы или скоростной характеристики следует иметь в виду, что на всем пути не должно быть участков, где после увеличения скорость начинает снижаться, а потом снова возрастать.

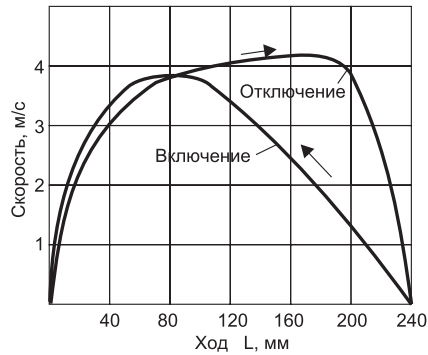


Рис. 8. Скоростные характеристики масляного выключателя (ВМП-10) при включении и отключении, построенные по виброграммам

Наличие таких участков свидетельствует о провале скорости (местном замедлении), что недопустимо. Измеренные характеристики должны соответствовать данным предприятий-изготовителей (табл. 5).

Принимается, что при температуре от $+10$ до $+20$ °С различие должно составлять не более 10 %.

При снятии виброграммы лента закрепляется либо на штанге, несущей траверсу с контактами, либо на промежуточной подвижной детали (на тяге, валу и т. п.). В последнем случае ленту предварительно градуируют: на штангу траверсы наносят метки и при медленном включении МВ вручную делают на виброграмме отметки, соответствующие положению траверсы в характерных точках. Если измерения проводились непосредственно на штанге бакового выключателя при опущенных баках, то полученные значения скорости оказываются выше, чем при движении в масле, на 15–20 % для однобаковых и 8–15 % для трехбаковых выключателей (при одном опущенном баке).

Надо еще учитывать, что в процессе эксплуатации скорость движения контактов несколько уменьшается как при включении, так и при отключении. Это происходит из-за увеличения сил трения по мере высыхания и загрязнения смазки, появления перекосов вследствие ослабления затяжки пружин и пр. Чтобы в период эксплуатации значения скорости оставались в норме, при вводе и после среднего ремонта они должны быть по крайней мере на 10 % выше минимально допустимых по норме.

Следует заметить, что способ получения скоростных характеристик с помощью виброграмм имеет определенные недостатки: трудоемкость испытаний, необходимость обработки виброграммы и связанные с этим затраты труда и возможность ошибок, ненадежность пишущего узла. В настоящее время в некоторых пусконаладочных и энергоснабжающих организациях созданы и применяются электронные цифровые приборы.

Принцип их действия основан на подсчете числа импульсов, поступающих от бесконтактного датчика движения штанги, и преобразовании его в значение скорости для каждой контрольной точки. Полученные данные хранятся в памяти прибора и в удобное для испытателя время могут быть извлечены из нее или выданы на компьютер для построения кривой.

Таблица 5. Скоростные и временные характеристики масляных выключателей

| Тип выключателя | Скорость движения контактов, м/с | | | | Собственное время, с | |
|---|----------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------|
| | При включении | | При отключении | | включе- ния | отключе- ния |
| | макси- мальная | при замы- кании | макси- мальная | при размы- кании | | |
| ВPM-10 | 2,6 | 2,0—2,6 | 3,9 | 2,1—2,7 | 0,3 | 0,12 |
| МГ-10 | — | 2,0—2,4 | 2,4 | 1,5—2,1 | 0,75 | 0,14 |
| МГГ-10-45У3 | 2,6 | 2,0—2,6 | 3,6 | 2,3—2,7 | 0,4 | 0,12 |
| МГГ-10-5000-63У3 | 3,6 | 2,7—3,3 | 3,6 | 2,3—2,7 | 0,4 | 0,11 |
| ВМ-14, ВМ-16 | 1,8 | 1,65 | 1,24 | 1,22 | 0,24 | 0,12 |
| ВМ-35 | 1,7 | — | 2,45 | — | 0,23 | 0,06 |
| ВМГ-133 | 3,2 | 2,4—3,0 | 3,2 | 1,75—2,0 | 0,23 | 0,10 |
| ВМГ-10 | 2,6 | 2,0—2,6 | 3,9 | 2,1—2,7 | 0,30 | 0,12 |
| ВММ-10 | 3,2 | 2,4—2,8 | 3,2 | 1,9—2,5 | 0,30 | 0,12 |
| ВМПЭ-10-630 (1000, 1600) | 5,7 | 4,7—5,0 | 5,0 | 3,0—3,3 | 0,30 | 0,07 |
| ВМПЭ-10-3150 | 5,7 | 4,0—4,4 | 4,5 | 3,1—3,4 | 0,30 | 0,09 |
| ВМП-10 | 5,0 | 4,0—5,0 | 5,0 | 3,0—3,8 | 0,30 | 0,10 |
| ВМП-10П | 6,0 | 4,1—4,9 | 5,0 | 3,2—3,8 | 0,20 | 0,10 |
| ВМПП-10-20 | — | 4,2—4,6 | — | 2,5—2,7 | 0,20 | 0,10 |
| 10-31,5 | — | 4,5—4,9 | — | 2,8—3,0 | 0,20 | 0,10 |
| С-35-630 с приводом ШПЭ-12 | 3,0 | 2,4—3,0 | 1,8 | 0,8—1,2 | 0,34 | 0,05 |
| ПП-67 | 3,0 | 2,4—3,0 | 1,8 | 0,8—1,2 | 0,40 | 0,12 |
| С-35-3200-50 (привод ШПЭ-38) | 3,2 | 2,3—2,5 | 2,4 | 1,5—1,7 | 0,64 | 0,06 |
| МКП-35 | 3,2 | 1,7—1,9 | 3,6 | 1,6—1,8 | 0,40 | 0,05 |
| ВТ-35 | 2,4 | 1,5—2,1 | 2,9 | 0,9—1,3 | 0,35 | 0,12 |
| ВТД-35 | 2,7 | 1,9—2,5 | 3,4 | 0,9—1,3 | 0,35 | 0,12 |
| МКП-110 | 3,8 | 1,7—1,9 | 2,9 | 1,3—1,5 | 0,60 | 0,05 |
| У-110-2000-40 с при- водом ШПВ (ШПЭ) | 3,3 | 1,7—1,9 | 3,7 | 1,3—1,5 | 0,30 | — |
| ВМТ-110 | — | 2,7—3,3 | — | 2,3—2,9 | 0,13 | 0,03 |

3.7.2. Измерение собственного времени включения и отключения выключателя.

Собственное время включения — время от момента подачи импульса на включение до момента замыкания контактов МВ. Собственное время отключения — время от момента подачи импульса на отключение до момента замыкания контактов. Скоростные характеристики дают информацию о движе-

нии контактных частей, собственное время зависит также и от работы аппаратуры управления МВ до начала движения (инерционность электромагнитов включения и отключения, исполнительного двигателя и пр.).

Для измерения собственного времени применяются электромеханические секундомеры (например, по типу ПВ-53Л, П14-2М) и миллисекундомеры (например ЭМС-54), а также электронные (например Ф-738).

Миллисекундомеры применяются в случае, когда погрешность секундомера (до 0,05 с) оказывается неприемлемой. Секундомер ПВ-53Л содержит электровибратор на базе поляризованного реле, последовательно с обмоткой которого включены ограничивающие резисторы. Запуск осуществляется подачей напряжения на обмотку, останов — снятием напряжения или шунтированием обмотки. В секундомере П14-2М вместо вибратора применен электродвигатель, запуск и останов которого осуществляются соответственно подачей или снятием напряжения. Схема измерения времени показана на рис. 9.

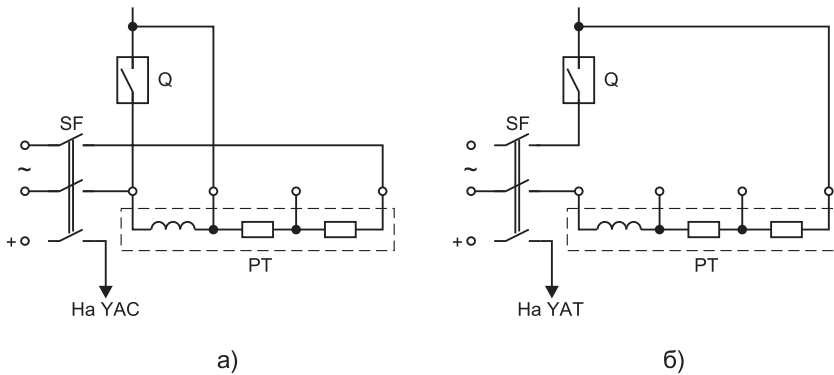


Рис. 9. Схема измерения времени включения (а) и отключения (б) масляного выключателя: SF — автоматический выключатель; Q — масляный выключатель; PT — секундомер (типа ПВ-53Л); YAC — электромагнит включения; YAT — электромагнит отключения

Измеренные значения не должны отличаться от приведенных в табл. 5 или заводских данных более чем на $\pm 10\%$. В противном случае следует произвести ревизию МВ и повторить измерения. При испытании выключателей, данные для которых отсутствуют, можно ориентироваться на результаты испытаний аналогичных МВ.

3.8. Проверка и испытание приводов выключателей

3.8.1. Проверка и регулировка приводов.

Приводы обычно регулируются на предприятии-изготовителе, но тем не менее требуют проверки на месте монтажа и подрегулировки отдельных узлов. Регулировка механической части привода производится обычно электромонтажным персоналом (при необходимости — с участием наладчиков) и имеет свои особенности в зависимости от типа привода.

Среди *ручных* приводов наиболее распространены типы ПРАМ-10 (привод ручной с автоматическим отключением) и ПРБА (ручной блинкерный с авто-

матическим отключением). При их регулировке и проверке требуется соблюдать осторожность для предотвращения несчастных случаев при случайных отключениях выключателя. С этой целью рекомендуется установить стопорные приспособления между собачкой и корпусом привода.

Некоторые типы ручных приводов снабжены электромагнитами для отключения. Если привод имеет реле минимального напряжения, то во время регулировки необходимо принудительно удерживать боек реле в отключенном положении, так как в противном случае нельзя будет включить выключатель.

Пружинные (грузовые) приводы применяются для выключателей почти всех типов. Наиболее широкое распространение получили приводы типов ППМ-10, ПП-67 (ПП-61) и встроенные пружинные приводы.

Пружинные приводы типов КППМ, ППК-63 имеют кинематическую схему, аналогичную ППМ-10.

В пружинно-грузовых приводах имеются электромагниты дистанционного включения и отключения, которые надо тщательно осмотреть. Если сердечники и бойки покрыты ржавчиной или масляной краской, загрязнения надо удалить, а затем слегка отшлифовать шкуркой части, которые не имеют защитного покрытия; сердечники и контрполюса с поврежденными защитными покрытиями подлежат замене. Боек сердечника должен быть надежно закреплен и не иметь искривлений. Проверяются надежность хода сердечника в латунной гильзе (от руки) и плотность установки гильзы.

Электромагнитные (соленоидные) приводы. Наиболее широко распространены приводы типов ПЭ и ПС; конструкция их различна, но регулировка рычажной системы в основном одинакова. Схема управления приводом имеет электрическую блокировку от самопроизвольного повторного включения на короткое замыкание («прыгания»): с помощью специальных блок-контактов, связанных с сердечником отключающего электромагнита, осуществляется автоматический разрыв цепей питания после произведенной операции. Блок-контакт в цепи управления должен размыкаться в самом конце операции включения, чтобы дать возможность включиться МВ. Для проверки блокировки от прыгания включают МВ ключом управления и, не отпуская рукоятки, замыкают цепь отключения. Выключатель должен один раз отключиться и оставаться включенным, пока замкнуты цепи отключения и включения.

Механизмы некоторых приводов выполнены таким образом, что необходимость в применении блокировки от «прыгания» исключается.

3.8.2. Проверка и регулировка элементов схемы.

Блок-контакты приводов выключателей. Используются специальные блок-контакты типов КСА, КСУ и аварийные КСА, которые представляют собой переключатель цепей, механически связанный с подвижными частями выключателя. Во встроенных приводах применяются также блок-контакты типа БКМ. Блок-контакты типа КСУ имеют специальный ускоритель, с помощью которого они размыкаются в самом конце операции включения; это позволяет предупредить срыв операции из-за недостаточной продолжительности импульса на включение. КСУ в цепи отключения должен разомкнуть свои контакты в начале процесса отключения, чтобы предотвратить подгорание контактов выходных промежуточных реле защиты, и замкнуть их в начале

процесса включения, так как в случае включения выключателя на короткое замыкание должна быть сразу собрана цепь на его отключение.

Регулировку контактов производят при медленных ручных включениях и отключениях МВ. В крайних положениях МВ замыкание или размыкание контактов КСА и КСУ должно быть строго фиксировано. Подрегулировку контактов производят изменением длины специальных тяг, а также перестановкой шайб КСА на нужный угол грани вала. Следует помнить, что контакты, работающие на включение и отключение, должны быть сдвинуты на угол 90° . Угол между передаточным рычагом комплекта КСА и направлением тяги должен быть не менее 30° . Зазор между контактами КСА должен быть не менее 3—5 мм, КСУ 4—5 мм.

При использовании проскальзывающего контакта подключают параллельно с ним размыкающий контакт КСУ. Увеличить время замкнутого состояния контактов можно посредством параллельного включения контактных шайб, повернутых на некоторый угол. Окончательная проверка регулировки контактов производится в собранной схеме при многократном опробовании выключателя.

Ключи управления и сигнальная арматура. Универсальные ключи управления проверяют на отсутствие механических повреждений и перекосов при повороте ключа. Кроме того, проверяют самовозврат рукоятки ключа в среднее положение, фиксацию рукоятки в различных положениях ключа, отсутствие заеданий в промежуточных положениях.

При наличии встроенной лампы в ключе или отдельной сигнальной арматуры следует убедиться в том, что внутренние контактные штыри не западают, установлены лампы надлежащего типа и напряжения, сопротивление добавочного резистора соответствует мощности лампы и напряжению сети оперативного тока. Проверяется также соответствие диаграмм переключения всех ключей проектной схемы.

Релейная аппаратура. В объем проверки входит измерение и регулировка напряжения трогания и возврата, времени отпадания реле, измерение сопротивления обмотки. Проверка напряжения трогания и возврата производится с помощью потенциометра, сопротивление которого выбирается обычно из расчета 1 Ом на 1 В напряжения питания.

Слишком высокое напряжение трогания реле может привести к его отказу при понижении напряжения оперативного тока. Напряжение возврата не нормируется, но возврат должен быть четким во избежание ложной работы схемы. При регулировке полезно иметь в виду, что:

- уменьшение воздушного зазора между якорем и сердечником реле уменьшает напряжение трогания;
- уменьшение конечного зазора между якорем и сердечником уменьшает напряжение возврата;
- ослабление возвратной пружины уменьшает напряжение трогания.

Реле времени проверяются с помощью электрического секундомера при номинальном напряжении на обмотке реле. Время трогания промежуточных реле постоянного тока с демпфирующими кольцами регулируют изменением количества последних, время возврата при снятии напряжения — изменением зазора между якорем и магнитопроводом реле.

3.8.3. Проверка напряжения срабатывания приводов выключателей.

Производится (без тока в главной цепи) для определения фактических значений напряжения на зажимах электромагнитов приводов, при которых выключатели сохраняют работоспособность, т. е. выполняют операции включения и отключения от начала и до конца. При этом временные и скоростные характеристики могут не соответствовать нормируемым значениям.

Напряжение срабатывания должно быть на 15—20 % меньше нижнего предела рабочего напряжения на зажимах электромагнитов приводов.

Масляные выключатели должны обеспечивать надежную работу привода при следующих значениях напряжения: при отключении 65—120 % номинального; при включении 80—110 % номинального (с током включения до 50 кА) и 85—110 % номинального (с током включения более 50 кА). При указанных значениях нижних пределов рабочего напряжения приводов выключатели (без тока в главной цепи) должны обеспечивать нормируемые предприятиями-изготовителями временные и скоростные характеристики.

Для привода на переменном оперативном токе напряжение срабатывания электромагнитов управления определяется с помощью ЛАТРа, на постоянном оперативном токе — с помощью потенциометра или ЛАТРа с выпрямителем для контакторов включения и катушек отключения.

Испытание соленоидов включения представляет известную сложность в связи с большими значениями тока втягивания, достигающими десятков и даже сотен ампер (например, приводы типа ПС). В этом случае можно рекомендовать применение в качестве источника питания регулируемых трансформаторов с выпрямителем или трансформаторы с регулируемыми (тиристорными) выпрямителями, желательно по трехфазной схеме для сглаживания и повышения выпрямленного напряжения. Следует иметь в виду, что при питании от выпрямителей необходимо использовать вольтметры магнитоэлектрической или выпрямительной системы.

Иногда для снижения напряжения включают последовательно с обмоткой соленоида резисторы, в частности сопротивлением 0,5—1,5 Ом для приводов типов ПС-10М, ПЭ-11. Пусть, например, требуется рассчитать добавочное сопротивление R_d к включающему электромагниту привода ПЭ-11, имеющему сопротивление 3,86 Ом, для получения на его зажимах напряжения 80 % $U_{ном} = 0,8 \times 220 = 176$ В. При этом напряжении ток потребления обмотки составит $I = 176/3,86 = 45,7$ А. Внутреннее сопротивление источника питания и подводящей сети R_c должно быть известно; пусть $R_c = 0,2$ Ом, тогда падение напряжения на нем будет $45,7 \times 0,2 = 9,1$ В. Остается «погасить» напряжение $220 - 176 - 9,1 = 34,9$ В, для чего потребуется сопротивление $R_d = 34,9/45,7 = 0,76$ Ом.

Изготовить такой резистор можно из нихромовой проволоки диаметром 1,2—2 мм.

Повысить испытательное напряжение сверх номинального значения можно с помощью вольтдобавочного трансформатора.

Проверка срабатывания электромагнитов производится пофазно.

Если обмотки электромагнитов у выключателей с пофазными приводами соединены последовательно, за напряжение срабатывания принимают то ми-

нимальное значение напряжения, при котором надежно срабатывают все три привода.

3.9. Испытание выключателя многократными опробованиями

Многократные опробования — выполнение операций включения (В) и отключения (О) и сложных циклов (ВО без выдержки времени — для всех выключателей; ОВ и ОВО — для выключателей, предназначенных для работы в режиме АПВ) — должны производиться при номинальном напряжении на выводах электромагнитов. Число операций и сложных циклов должно составлять:

- 3—5 операций включения и отключения;
- 2—3 цикла каждого вида.

Следует помнить, что электрическое включение МВ приводом допускается не более 10 раз подряд, после чего необходим перерыв для охлаждения обмоток электромагнитов, так как они рассчитаны лишь на кратковременное протекание тока.

3.10. Испытание встроенных трансформаторов тока

Отличительной особенностью встроенных трансформаторов тока является отсутствие отдельной первичной обмотки. Испытание их см. п. 11.

4. Воздушные выключатели (ВВ)

4.1. Краткие сведения

Воздушные выключатели на напряжение от 35 кВ и выше предназначены для отключения больших токов короткого замыкания; ВВ на напряжение 15 кВ применяются на электростанциях как генераторные. Их преимущества: быстрдействие, большая отключающая способность, незначительное обгорание контактов, отсутствие дорогих и недостаточно надежных вводов, пожаробезопасность, меньшая масса по сравнению с баковыми масляными выключателями. Недостатки: наличие громоздкого воздушного хозяйства, опасность взрыва, отсутствие встроенных трансформаторов тока, сложность устройства и эксплуатации.

ВВ на 110 кВ и выше состоят из трех одинаковых полюсов, не имеющих между собой механической связи, что дает возможность управлять каждым полюсом отдельно. ВВ на 15 и 35 кВ имеют общий для трех полюсов пневматический привод и механическую связь между полюсами.

Управление ВВ осуществляется дистанционно подачей командных импульсов на электромагниты управления, которые, в свою очередь, воздействуют на клапаны выключателя. В среднем для срабатывания электромагнита требуется около 20 мс, для открытия каждого клапана и наполнения связанных с ним полостей — несколько миллисекунд, для движения воздуха по воздухопроводу — более 10 мс.

ВВ на напряжение 110 кВ и выше применяются с воздушнонаполненным или открытым (ножевым) отделителем. Рядом с дугогасительной камерой устанавливается резисторный делитель, предназначенный для выравнивания напряжения по контактным разрывам камеры при операции отключения. Рядом с отделителем устанавливается емкостный делитель, выравнивающий распределение напряжения по контактным разрывам отделителя при отключении и в отключенном положении выключателя.

При операции отключения контакты камеры разрывают ток, затем последовательно соединенные с ними контакты отделителя размыкаются, отключая при этом ток омического делителя, после чего контакты камеры вновь замыкаются. Включение ВВ осуществляется замыканием только контактов отделителя.

Основными временными характеристиками ВВ являются следующие.

- Промежуток времени от момента подачи оперативного тока на обмотку электромагнита отключения до начала размыкания дугогасительных контактов камеры называется *собственным временем отключения*. Причинами увеличения собственного времени отключения могут быть:
 - а) ненормальная работа электромагнита отключения; следует иметь в виду, что установка электромагнитов без форсировки может увеличить собственное время отключения на 10—20 мс;
 - б) ненормальная работа клапанов, низкая температура в шкафу управления.

- Интервал времени между моментами размыкания первого и последнего контактов камеры называется *неодновременностью размыкания контактов гасительной камеры*. Увеличение этого интервала указывает на ненормальную работу подвижных контактов камер, вызванную применением непригодной смазки, загрязнением механизмов камер или дефектом пружин.
- Интервал времени от момента размыкания последнего контакта камеры до первого вибрационного замыкания называется *бесконтактной паузой гасительной камеры*.

Продолжительность ее зависит в первую очередь от длительности подачи воздуха в камеры, т. е. от сброса давления. Малая бесконтактная пауза одной из камер может быть следствием того, что установлена слишком сильная пружина или велик вжим подвижного контакта. Запаздывание замыкания контакта одной камеры может быть вызвано заеданием подвижного контакта из-за непригодной смазки или загрязнения. Значительное запаздывание может быть следствием ослабления или поломки пружины механизма контакта.

- Интервал времени между моментами замыкания первого и последнего контактов камеры, включая вибрацию, — *разновременность замыкания контактов гасительной камеры*. Увеличение этого интервала чаще всего вызвано повышенной вибрацией контактов, которая возникает из-за отсутствия или слишком малого диаметра antivибрационных отверстий во фланце камеры.
- Интервал времени от размыкания последнего контакта камеры до момента размыкания первого контакта отделителя характеризует *запаздывание отделителя*. Регулируется изменением диаметра отверстия диафрагмы в импульсном трубопроводе. Необходимо учитывать, что даже небольшое увеличение площади отверстия приводит к значительному уменьшению запаздывания.
- Интервал времени между моментами замыкания первого и последнего контактов отделителя — *разновременность размыкания контактов отделителя*. Время размыкания контакта отделителя пропорционально числу открытых отверстий в корпусе подвижного контакта отделителя.
- Интервал времени между моментами первого замыкания контакта отделителя и полного замыкания его контактов, включая вибрацию, — *разновременность замыкания контактов отделителя*. Минимальная разновременность обеспечивается подбором пружин механизмов на заводе-изготовителе.

Продолжительная вибрация одного из контактов отделителя может быть вызвана неисправностью механизма неподвижного контакта отделителя.

- Время от подачи импульса на включение до момента касания контактов отделителя есть *время включения выключателя*. Причиной увеличения этого времени может быть ненормальная работа клапанов управления вследствие применения непригодной смазки, загрязнения или низкой (менее 5 °С) температуры в шкафу управления.
- *Бесконтактная пауза АПВ* — промежуток времени от последнего размыкания контактов камеры при отключении до первого вибрационного замыкания контактов отделителя при включении.

Приводимые ниже сведения и нормы относятся к ВВ на напряжение до 110 кВ включительно.

4.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) опорных изоляторов, изоляторов гасительных камер и отделителей и изолирующих тяг выключателей всех классов напряжения. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ или от источника выпрямленного тока.

В случае необходимости измерение сопротивления изоляции опорных изоляторов, изоляторов гасительных камер и отделителей следует производить с установкой охранных колец на внешней поверхности.

Значения сопротивления изоляции должны быть не ниже приведенных в табл. 6.

Таблица 6. Наименьшее допустимое сопротивление опорной изоляции и изоляции подвижных частей воздушных выключателей

| Испытуемый объект | Сопротивление изоляции, МОм, при номинальном напряжении выключателя, кВ | |
|---|---|--------|
| | До 10 | 15–150 |
| Опорный изолятор, воздухопровод и тяга (каждое в отдельности), изготовленные из фарфора | 1000 | 3000 |

Сопротивление изоляции чехлов камер и отделителей измеряется до установки в них механизма, после гидравлических и механических испытаний изоляторов, промывки и подсушки. Если изолятор имеет жесткую армировку, напряжение подается прямо на армировку, при ее отсутствии — на электроды из фольги, прижимаемые к торцам грузом через резиновые прокладки. Для опорных изоляторов, изоляторов гасительных камер и отделителей измерения в сырую погоду производятся с применением охранных колец на внешней поверхности, которые выполняются несколькими витками медного жгута. Измерение для изолирующих тяг производится после установки их на выключатель;

б) вторичных цепей, обмоток электромагнитов включения и отключения. См. п. 2.2.2, б.

4.3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты

а) изоляции выключателей. Обязательно для выключателей до 35 кВ.

Опорную фарфоровую изоляцию следует испытывать в соответствии с табл. 3 и 7. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин.

Таблица 7. Испытательное напряжение промышленной частоты для опорной фарфоровой изоляции.

| Класс напряжения, кВ | Испытательное напряжение, кВ |
|----------------------|------------------------------|
| 15 | 55,0 |
| 20 | 65,0 |
| 35 | 95,0 |

Испытание проводится после окончания монтажа выключателя. При понижении температуры воздуха внутренние полости фарфоровых изоляторов могут увлажниться. В этом случае за 3—6 ч до испытания ВВ ставят на усиленную продувку;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. См. п. 2.5, б.

4.4. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактов ВВ всех классов напряжения. Измерению подлежит сопротивление контактов каждого элемента гасительной камеры, отделителя, ножа и т. п. в отдельности (табл. 8).

Таблица 8. Наибольшие допустимые значения сопротивления контактов ВВ

| Тип выключателя | Номинальное напряжение, кВ | Номинальный ток, А | Сопротивление, мкОм | | | |
|--------------------|----------------------------|--------------------|----------------------|--------|-----------------------|-----------------|
| | | | всего контура полюса | камеры | одного разрыва камеры | ножа отделителя |
| ВВ-15/600 | 15 | 600 | 120 | — | — | — |
| ВВ-15/5500 | 15 | 5500 | — | 15/36 | — | — |
| ВВН-35/600 | 35 | 600 | 100 | — | — | — |
| ВВН-35/1000 | 35 | 1000 | 60 | — | — | — |
| ВВН-35/2 | 35 | 2000 | 60 | — | — | — |
| ВВН-110/800/4000 | 110 | 800 | 200 | 150 | 75 | 50 |
| ВВН-110/2000/4000 | 110 | 2000 | 150 | 100 | 50 | 50 |
| ВВ-4001-110/600 | 110 | 600 | 500 | 200 | 100 | 250 |
| ВВН-110У/800-4000 | 110 | 800 | 200 | 150 | — | 50 |
| ВВН-110-6, ВВШ-110 | 110 | 2000 | 140 | 40 | — | 40 |

Примечания. 1. 15/36 — сопротивление рабочих/дугогасительных контактов.

2. Предельные значения сопротивлений одного элемента (разрыва) гасительной камеры и отделителя и одного дугогасительного устройства модуля: выключателя серии ВВН — 20 мкОм, ВВУ, ВВБ, ВВБК — 80 мкОм, ВВН — 70 мкОм.

Измерения выполняют после наладки выключателя. Используются цифровые и аналоговые микроомметры, мосты постоянного тока. Измерения самых малых значений сопротивления методом амперметра-вольтметра предпочтительно проводить при токе порядка 100 А, который можно получить от сварочного генератора постоянного тока или от выпрямителя. Провода сечением не менее 95 кв. мм следует присоединять к аппаратным зажимам выключателя, чтобы учесть сопротивление перехода от фланца к контакту. В качестве токовых проводов могут быть использованы участки ошиновки РУ. При меньшем измерительном токе (десятки ампер) можно использовать аккумуляторную батарею емкостью не менее 80 А · ч. Применение аккумулятора с недостаточной емкостью или разряженного затруднит поддержание неизменного значения тока во время измерения;

б) обмоток электромагнитов включения и отключения. Устанавливается для каждого типа выключателей согласно табл. 9 или данным предприятия-изготовителя.

Таблица 9. Сопротивление постоянному току обмоток электромагнитов воздушных выключателей

| Тип выключателя | Соединение электромагнитов трех фаз | Напряжение, В | Сопротивление обмотки, Ом |
|--|--|---------------|---|
| ВВН-35, ВВ-2503, ВВ-4001, ВВН-110, ВВУ-35, ВВБ-110, ВВБМ-110, ВВУ-11 | Раздельное или параллельное (электромагниты с форсировкой) | 220 | 1-я — $10^{+1,5}$ 2-я — $45^{+2,0}$ обе — $55^{+3,5}$ |
| | | 110 | 1-я — $2,4^{+0,05}$ 2-я — $11,3^{+0,55}$ обе — $13,7^{+0,55}$ |
| ВВ-2503, ВВ-4001, ВВ-4001У, ВВН-11, ВВ-2503, ВВ-4001 | Раздельное или параллельное | 220 | $64^{+3\%}_{-8\%}$ |
| ВВ-4001У, ВВН-11, ВВ-35, ВВН-35 | Последовательное | 220 | $8,3^{+3\%}_{-8\%}$ |
| ВВ-15/5500 | — | 220 | $49^{+1,47\%}_{-3,92\%}$ |
| ВВ-15/600 | — | 220 | 55^{+2} |
| ВВН-35, ВВН-110 | Раздельное или параллельное | 110 | $16,3^{+3\%}_{-8\%}$ |
| ВВ-2503, ВВ-4001 | Раздельное или параллельное | 110 | $31,3^{+2}$ |
| ВВН-110 | Последовательное | 110 | $1,68^{+3\%}_{-8\%}$ |

При проверке измерение следует производить прибором с погрешностью не более 3 %. При проверке электромагнитов с обмоткой из двух секций измеряется сопротивление каждой секции;

в) делителей напряжения и шунтирующих резисторов выключателя.

Нормы устанавливаются предприятием-изготовителем; некоторые из них приведены в табл. 10.

Таблица 10. Предельные значения сопротивления постоянному току делителей напряжения и шунтирующих резисторов воздушных выключателей

| Тип выключателя | Предельное значение сопротивления, Ом |
|-----------------|---------------------------------------|
| ВВУ-35 | $4,6 - 0,25$ |
| ВВУ-110 | 100 ± 2 |
| ВВБ-110-6 | 150 ± 5 |
| ВВБМ-110Б | 50 ± 1 |
| ВВН-110-6 | 150 ± 5 |
| ВВШ-110 | 150^{+4}_{-2} |

Измерения рекомендуется производить при напряжении источника питания 110—220 В, так как при более низком напряжении возникают значительные погрешности из-за наличия большого числа контактов между отдельными блоками резисторов. Требуемая точность измерений — не менее 1 %. Если колонка собрана из нескольких элементов, напряжение подают к верхнему и нижнему фланцам.

4.5. Проверка характеристик выключателя

Характеристики выключателя, снятые при номинальном, минимальном и максимальном рабочем давлении при простых операциях и сложных циклах,

должны соответствовать данным предприятия-изготовителя, в частности, приведенным в табл. 11.

Таблица 11.1. Нормы временных и скоростных характеристик воздушных выключателей на напряжение 15 и 35 кВ

| Характеристика | Типы выключателей | | |
|---|-------------------|------------|---------------------|
| | ВВ-15/600 | ВВ-15/5500 | ВВН-35/600, 1000 |
| Собственное время отключения, с, не более | 0,06 | 0,08 | 0,07 |
| Собственное время включения, с, не более | 0,12 | 0,15 | 0,30 |
| Скорость движения дугогасительного контакта, м/с | | | |
| а) при включении: | | | |
| наибольшая | | 5,0—6,1 | |
| в момент замыкания | | 5,0—6,1 | |
| б) при отключении | | | |
| наибольшая | | до 7,2 | |
| в момент размыкания | | 2,8—3,2 | |
| Наибольшая скорость движения нижних подвижных контактов, м/с | | | |
| при включении | | | 3 ^{+0,5} |
| при отключении | | | 4 ^{+0,5} |
| Скорость движения нижних подвижных контактов при включении в момент смыкания, м/с | | | 2,5 ^{+0,5} |

Таблица 11.2. Нормы временных и скоростных характеристик воздушных выключателей с воздушнонаполненным отделителем типов ВВН-110-6, ВВШ-110

| Характеристики | Значение |
|--|-------------|
| Собственное время отключения, с, не более | 0,05 |
| Разновременность размыкания контактов гасительной камеры полюса, с, не более | 0,004 |
| Бесконтактная пауза гасительной камеры, с | (0,005) |
| Разновременность замыкания контактов гасительной камеры, с | 0,10—0,16* |
| Запаздывание размыкания контактов отделителя, с | 0,03—0,05 |
| Разновременность размыкания контактов отделителя, с, не более | 0,01 |
| Разновременность отключения полюсов выключателя, с, не более | 0,01 |
| Длительность отключающего импульса, с, не менее | 0,04 |
| Собственное время включения, с, не более | 0,25 (0,20) |
| Разновременность замыкания контактов отделителя, с, не более | 0,025 |
| Разновременность включения полюсов выключателя, с, не более | 0,04 |
| Длительность включающего импульса, с, не менее | 0,07 |
| Бесконтактная пауза АПВ, с, не более | 0,30 |

* Проверяется только при использовании выключателей в режиме АПВ. Вибрация контактов камеры должна прекратиться за время не менее, чем 0,05 с до первого замыкания контактов отделителя в цикле О—В.

Примечание. Нормы, приведенные в скобках, относятся к выключателям типа ВВШ-110.

Таблица 11.3. Нормы временных и скоростных характеристик воздушных выключателей типов ВВБМ, ВБУ и ВВБК

| Характеристика | Типы выключателей | | | |
|--|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| | ВВБМ-110 | ВБУ-35 | ВБУ-110 | ВВБК-110Б |
| Собственное время отключения, с | 0,045—0,055 | 0,045—0,055 | 0,055—0,065 | 0,040—0,048 |
| Разновременность размыкания главных контактов, с, не более: | | | | |
| одного полюса | — | — | 0,004 | — |
| трех полюсов | 0,004 | 0,005 | 0,008 | 0,010 |
| Запаздывание размыкания шунтирующей цепи относительно последнего размыкания главных контактов, с | 0,027—0,040 | — | — | 0,027—0,040 |
| Разновременность размыкания контактов шунтирующей цепи, с, не более | 0,003 | — | 0,003 | 0,004 |
| Длительность отключающего импульса, с, не менее | 0,03 | 0,03 | 0,03 | — |
| Собственное время включения, с, не более | 0,20 | 0,15 | 0,20 | 0,13 |
| Разновременность замыкания главных контактов полюса, с, не более | — | 0,002 | 0,010 | — |
| Запаздывание последнего замыкания контактов шунтирующей цепи относительно замыкания главных контактов, с, не более | 0,10 | — | 0,08 | 0,12 |
| Время от последнего замыкания контактов шунтирующей цепи при включении до первого размыкания главных контактов в циклах В—О и О—В—О, с, не менее | 0,01 | — | — | 0,01 |
| Время от замыкания главных контактов до их размыкания в цикле В—О, с | — | — | — | 0,12—0,14 |
| Бесконтактная пауза АПВ, с, не более | 0,23 | 0,19 | 0,20 | 0,30 |

Для снятия временных характеристик могут служить электромеханические секундомеры и электронные миллисекундомеры. Но при одной операции они позволяют произвести только одно измерение, а большое число часто повторяющихся операций может неблагоприятно сказаться на техническом состоянии выключателей и компрессоров.

Электромеханическим секундомером нельзя измерить с достаточной точностью промежутки времени менее 0,05 с, а определить время вибрации контактов этими приборами вообще невозможно. Поэтому применяют их лишь в отдельных случаях для измерения, например, собственного времени включения и отключения, бесконтактной паузы, времени запаздывания делителя и др.

Как правило, рекомендуется проверять временные характеристик ВВ с помощью магнитоэлектрического (светолучевого) осциллографа или компьютерного самописца. При пользовании светолучевым осциллографом скорость движения бумаги (или пленки) выбирается в пределах 0,5—2,5 м/с. Применяются обычно вибраторы низкой чувствительности, так как высокочувствительные вибраторы подвержены наводкам от находящихся вблизи токоведущих частей и имеют низкую частоту собственных колебаний, в результате чего запись может получиться нечеткой.

Для уменьшения наводок применяют следующие методы:

- сокращение количества подсоединенных к выключателю элементов, на которых может наводиться напряжение (перемычки, емкостные делители, шлейфы и т. п.);
- наложение заземления на один из выводов выключателя;
- использование многожильного кабеля с экраном.

Желательно использовать отдельный источник для питания каждого гальванометра, так как при питании двух или более гальванометров от одного источника возможно взаимное влияние параллельных цепей. В качестве источников питания применяют аккумуляторные батареи или многообмоточный понижающий трансформатор с выпрямителями и фильтрами.

Когда число вибраторов осциллографа недостаточно для записи работы всех контактов выключателя на одной осциллограмме, ведут запись на двух или трех осциллографах одновременно. Ток электромагнита следует записывать на каждой осциллограмме: момент подачи командного импульса на включающий или отключающий электромагнит служит началом отсчета времени. Если в осциллографе не предусмотрен специальный отметчик времени, можно использовать напряжение промышленной частоты. Возможно поочередное осциллографирование работы контактов камер и отделителей. Наименование и число обязательных операций и сложных циклов, выполняемых при номинальном напряжении на зажимах электромагнитов управления, приведены в табл. 12. Снимаются осциллограммы каждой приведенной в таблице операции или цикла.

Таблица 12. Условия и число опробований выключателей

| Операция или цикл | Давление в резервуаре | Число операций и циклов |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| Включение | Наименьшее рабочее | 3 |
| Отключение | Наименьшее рабочее | 3 |
| В—О | Наименьшее рабочее | 2 |
| Включение | Номинальное | 3 |
| Отключение | Номинальное | 3 |
| О—В | Номинальное | 2 |
| В—О | Наибольшее рабочее | 2 |
| О—В—О | Наибольшее рабочее | 2 |
| О—В—О | Наименьшее для АПВ | 2 |

На рис. 10 приведен пример осциллограммы работы контактов ВВ.

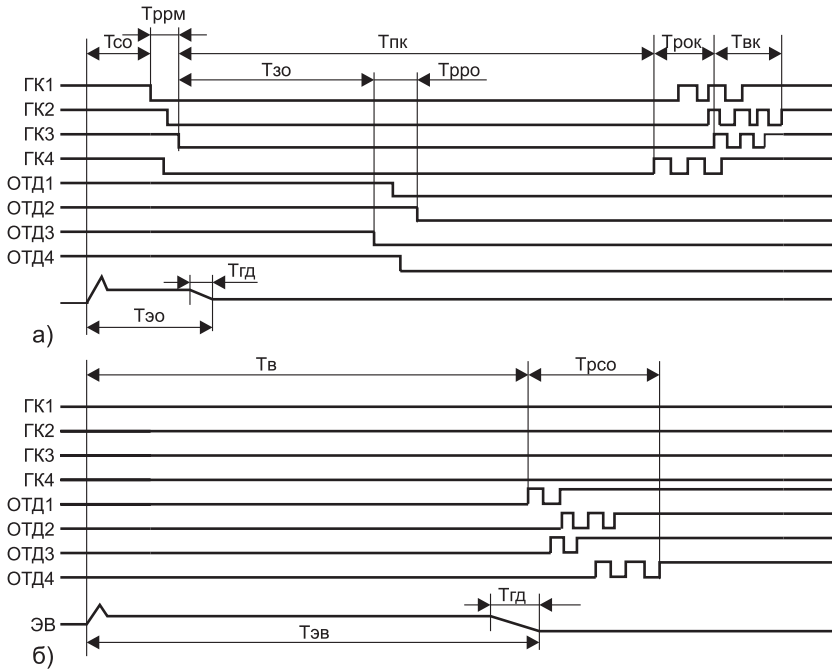


Рис. 10. Осциллограмма работы полюса ВВ: а — отключение; б — включение

На рис. 10 обозначены:

ГК1...ГК4 — разрывы гасительных камер;

ОТД1...ОТД4 — разрывы отделителей;

ЭО — ток электромагнита отключения;

ЭВ — ток электромагнита включения.

По осциллограмме отключения определяются:

$T_{со}$ — собственное время отключения;

$T_{ррк}$ — разновременность размыкания контактов гасительной камеры;

$T_{зо}$ — запаздывание размыкания контактов отделителя;

$T_{рро}$ — разновременность размыкания контактов отделителя;

$T_{пк}$ — бесконтактная пауза гасительной камеры;

$T_{рск}$ — разновременность смыкания контактов гасительной камеры;

$T_{вк}$ — длительность вибрации контактов гасительной камеры;

$T_{рск} + T_{вк}$ — разновременность смыкания контактов камеры, включая вибрацию (вибрация должна прекратиться не менее чем за 0,05 с до смыкания контактов отделителя в цикле О—В);

$T_{ЭО}$ — длительность отключающего импульса;

$T_{гдо}$ — длительность горения дуги на блок-контактах (время уменьшения тока в обмотке электромагнита).

По осциллограмме включения определяются:

$T_{в}$ — время включения;

$T_{рсо}$ — разновременность смыкания контактов отделителя;

$T_{ЭВ}$ — длительность включающего импульса;

$T_{гдв}$ — время горения дуги на блок-контактах.

Для снятия осциллограмм целесообразно использовать специальный пульт, один из возможных схемных вариантов которого приведен на рис. 11.

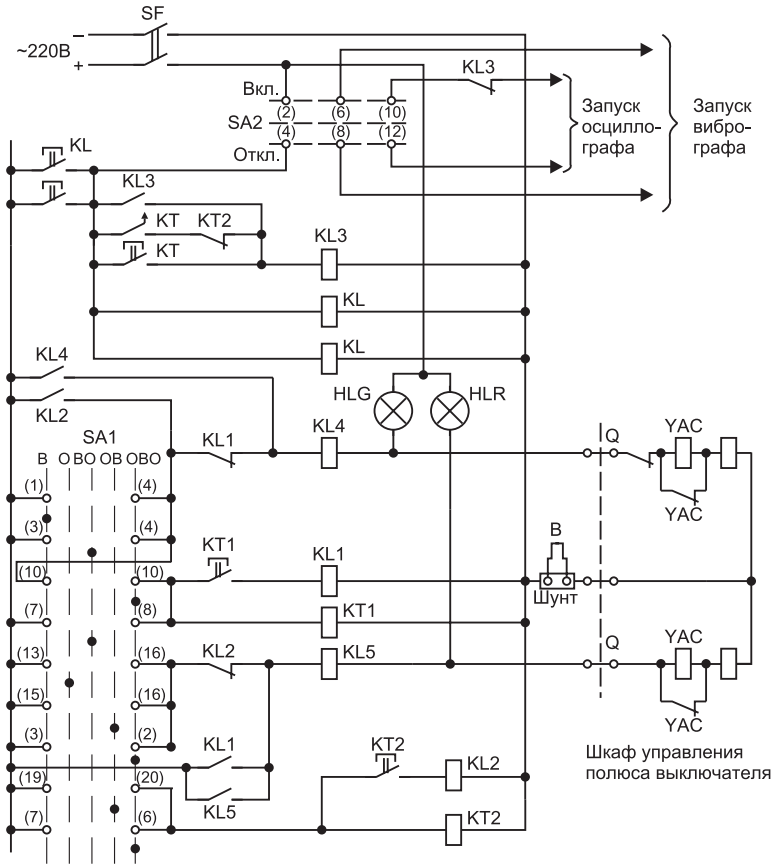


Рис. 11. Принципиальная схема пульта управления: SF — автоматический выключатель; SA1, SA2 — ключи управления; HLG, HLR — лампы сигнализации; KL, KL1...KL5 — реле промежуточные; KT, KT1, KT2 — реле времени; Q — блок-контакты полюса выключателя; В — гальванометр; YAC — электромагнит включения; YAT — электромагнит отключения

Следует иметь в виду, что при работе ВВ на него действуют большие ударные нагрузки, которые вызывают вибрацию выключателя. В связи с этим все контактные соединения на аппарате должны выполняться с повышенной надежностью, болтовыми. Наличие в этих цепях ненадежного контакта дает при вибрации ложные сигналы на осциллограмме.

Схема позволяет производить все требуемые при испытаниях операции и циклы: включение (В), отключение (О), включение на короткое замыкание (В—О), АПВ успешное (О—В), АПВ неуспешное (О—В—О).

Пульт может быть использован также и при наладке других типов выключателей. Указанные операции реализуются следующим образом.

Операция включения. Ключ SA1 устанавливается в положение «В» и ключом SA2 подается команда на запуск осциллографа. После выдержки времени

реле KL «плюс» оперативного тока подается на электромагнит включения YAC; начинается запись осциллограмм. Блок-контакт Q разрывает цепь питания YAC и сервисной обмотки реле KL4. Реле KT выдержкой времени включает реле KL3, которое отключает осциллограф.

Операция отключения (ключ SA1 в положении «О»). Ключом SA2 «плюс» оперативного тока подается в цепь электромагнита YAT и сервисной обмотки реле KL5, которая после отключения ВВ разрывается блок-контактом Q.

Включение на короткое замыкание (ключ SA1 в положении ВО). Одновременно с подачей напряжения на электромагнит YAT поступает напряжение на реле KT1, которое с выдержкой времени включает реле KL1, срабатывающее раньше, чем происходит переключение Q. Замыкание блок-контактов Q вызывает отключение полюса. Повторного включения его не произойдет, так как контакт KL1 в цепи электромагнита YAC разомкнут.

АПВ успешное. Ключ SA1 в положении ОВ. Ключом SA2 полюс отключается и с выдержкой времени реле KT2 включается снова. Выдержка времени выбирается таким образом, чтобы бесконтактная пауза АПВ составляла не более 0,3 с. Второго отключения не произойдет, так как контакты KL2 и KL5 разомкнуты.

АПВ неуспешное. Ключ SA1 устанавливается в положение О—В—О. Ключом управления SA2 полюс отключается, включается снова с выдержкой времени реле KT2, а затем с выдержкой времени реле KT1 отключается.

При проверке ВВ в циклах О—В и О—В—О длина кадра осциллограммы должна быть больше, чем при простых операциях. В этих случаях запуск реле KL3 производится с выдержкой времени реле KT.

Для связи осциллографа с камерой и отделителем наиболее пригоден телефонный кабель с диаметром жил 0,35—0,50 мм на 10 пар; для большей надежности жилы каждой пары целесообразно соединить параллельно. Чтобы жилы не изламывались выхлопом воздуха при отключении ВВ, их наращивают со стороны выключателя гибким изолированным проводом длиной 8—10 м сечением 0,5—1,5 кв. мм, а место соединения закрепляют бандажом. Провода, присоединяемые к камере и отделителю, должны иметь напаянные наконечники. Кроме телефонного кабеля, можно использовать шланговый кабель, контрольный кабель со снятой броней (для облегчения) или пучок гибких проводов, свитых в жгут.

Скоростные характеристики снимаются методами, описанными в п. 2.7.1. Эти испытания обязательны для выключателей с ножевым отделителем.

4.6. Проверка минимального напряжения срабатывания выключателя

Электромагниты управления должны срабатывать при напряжении не более 70 % при питании от источника постоянного тока и не более 65 % номинального при питании от сети переменного тока через выпрямительные устройства и наибольшем рабочем давлении сжатого воздуха. Напряжение должно подаваться толчком.

4.7. Испытание выключателя многократным включением и отключением

Количество операций и сложных циклов устанавливается согласно табл. 13.

Таблица 13. Условия и число опробований выключателей при наладке

| Операция или цикл | Давление при опробовании | Напряжения на выводах | Число операций и циклов |
|-------------------|--------------------------|-----------------------|-------------------------|
| 1. Включение | Наименьшее срабатывания | Номинальное | 3 |
| 2. Отключение | То же | То же | 3 |
| 3. В—О | » » | » » | 2 |
| 4. Включение | Наименьшее рабочее | » » | 3 |
| 5. Отключение | То же | » » | 3 |
| 6. В—О | » » | » » | 2 |
| 7. включение | Номинальное | » » | 3 |
| 8. Отключение | То же | » » | 3 |
| 9. О—В | » » | » » | 2 |
| 10. Включение | Наибольшее рабочее | 0,7 номинального | 2 |
| 11. Отключение | То же | То же | 2 |
| 12. В—О | » » | Номинальное | 2 |
| 13. О—В—О | » » | То же | 2 |
| 14. О—В—О | Наименьшее для АПВ | » » | 2 |

Должны быть сняты зачетные осциллограммы при выполнении операций и сложных циклов по п. 4—9, 12—14 (см. табл. 12).

4.8. Испытание конденсаторов делителей напряжения воздушных выключателей

4.8.1. Измерение сопротивления изоляции.

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции между выводами и относительно корпуса конденсатора и отношение R_{60}/R_{15} не нормируются.

4.8.2. Измерение емкости.

Производится при температуре 15—35 °С. Измеренное значение должно соответствовать паспортным данным с отклонением не более 5 %. Разница значений емкости конденсаторов в пределах полюса не должна превышать норм завода-изготовителя. Погрешность измерительных приборов должна быть не более 1 %.

4.8.3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.

Измеренное значение $\operatorname{tg} \delta$ при температуре 20 °С не должно превышать 0,3 %.

4.8.4. Испытание конденсаторов повышенным напряжением.

Испытывается изоляция относительно корпуса при закороченных выводах конденсатора. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин. При отсутствии источника переменного тока достаточной мощности можно производить испытания выпрямленным напряжением удвоенного зна-

чения по отношению к нормируемым значениям напряжения промышленной частоты (см. «Конденсаторы»).

4.9. Проверка хода якоря электромагнита управления

Ход якоря электромагнитов с форсировкой должен быть равен $8(-1)$ мм.

4.10. Специальные меры безопасности при наладке и опробовании воздушных выключателей

Работы по наладке выключателей должны выполняться в строгом соответствии с правилами техники безопасности для распределительных устройств напряжением выше 1000 В. Помимо этого, специфика конструкции и работы воздушных выключателей требует особых мер безопасности, к числу которых относятся следующие.

- управление выключателем должно осуществляться из укрытия, удаленного от крайнего полюса выключателя не менее чем на 10—15 м;
- опасная зона в радиусе 60 м от выключателя ограждается канатом, на котором вывешиваются предупредительные плакаты; из этой зоны должны быть удалены люди. До подачи воздуха в выключатель с него и из опасной зоны убираются все посторонние предметы, мелкие камни и проверяется надежность крепления всех болтов, гаек, шпилек, шурупов;
- не следует находиться без производственной необходимости вблизи отключенного выключателя. Подъем на отключенный ВВ с воздухом наполненным отделителем категорически воспрещается. При подъеме на ВВ с открытым отделителем не следует находиться под отключенным ножом отделителя или становиться на включенный нож;
- перед проведением работ на выключателе (присоединение и отсоединение проводов для осциллографирования, регулировка дутья и др.) необходимо принять меры, полностью исключающие возможность срабатывания ВВ: снять оперативный ток со щита управления, вставить изоляционные прокладки между ножами и губками рубильников, заклинить электромагниты приводов, закрыть кнопки пневматического управления или отсоединить от них трубки, идущие к выключателю. Выключатель с воздухом наполненным отделителем должен быть предварительно включен;
- первые операции по включению и отключению ВВ следует производить при пониженном давлении, постепенно повышая его в процессе работы. В случае перерыва наладочных работ и по окончании рабочего дня ВВ с воздухом наполненным отделителем нужно оставлять во включенном положении;
- нельзя оставлять на выключателе, в шкафах управления полюсами какие-либо незакрепленные детали, инструмент, а также оперировать выключателем, узлы которого надежно не закреплены.

5. Электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели

5.1. Электромагнитные выключатели

Требования, предъявляемые к электромагнитным выключателям, те же, что и к МВ, различия состоят только в значении нормируемых параметров. ПУЭ эти значения не регламентируются и при наладке выключателей следует руководствоваться указаниями фирм-изготовителей. В качестве примера в табл. 14 приведены нормы для выключателей типа ВЭМ.

Таблица 14. Нормы характеристик электромагнитных выключателей типа ВЭМ

| Характеристика | Тип выключателя | | |
|--|----------------------|-------------------|-------------------|
| | ВЭМ-6-2000-38,5-100 | ВЭМ-6-3200-40-125 | ВЭМ-6-2000-40-125 |
| Собственное время отключения, с, не более | 0,06 | 0,06 | 0,06 |
| Собственное время включения, с, не более | 0,30 | 0,30 | 0,35 |
| Скорость движения дугогасительных контактов, м/с: | | | |
| в момент размыкания | 3,2—3,7 | 3,4—4,0 | 3,4—4,0 |
| в момент замыкания | 2,8—3,3 | 4,4—4,7 | 4,0—4,5 |
| Сопротивление постоянному току токоведущего контура полюса, мкОм, не более | 45 | 45 | 45 |
| Наименьшее включающее напряжение привода, не более | 0,85U _{ном} | | |
| Наименьшее напряжение срабатывания электромагнита отключения, не более | 0,65U _{ном} | | |
| Число операций включения и отключения, подлежащих выполнению при наладке, в зависимости от напряжения на зажимах электромагнитов управления: | | | |
| при U _{ном} | 15 | 15 | 15 |
| при пониженном напряжении | 3 | 3 | 3 |
| при повышенном напряжении | 3 | 3 | 3 |

При расхождении данных табл. 14 с паспортными следует руководствоваться последними.

5.2. Элегазовые выключатели

5.2.1. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления.

Измерение выполняется по п. 2.2.2б.

5.2.2. Испытание изоляции выключателя выполняется напряжением промышленной частоты по нормам табл. 3. Допускается не производить испытание выключателей, заполненных элегазом на заводе-изготовителе и не подлежащих вскрытию в течение всего срока службы.

Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления выполняется по п. 2.5б.

5.2.3. Измерение сопротивления постоянному току.

1. Измерение сопротивления главной цепи. Измеряется сопротивление всего токоведущего контура полюса и отдельно каждого разрыва дугогасительного устройства.

2. Измерение сопротивления обмоток электромагнитов управления и добавочных резисторов в их цепи.

Измеренные значения должны соответствовать заводским нормам.

5.2.4. Проверка минимального напряжения срабатывания приводов.

Выключатели должны срабатывать при напряжении не более $0,85U_{\text{ном}}$ при питании привода от источника постоянного тока; $0,70U_{\text{ном}}$ при питании от сети переменного тока, номинальном давлении элегаза в полостях выключателя и наибольшем рабочем давлении в резервуарах привода. Напряжение на электромагниты должно подаваться толчком.

5.2.5. Испытание конденсаторов делителей напряжения.

Выполняется по п. 3.8. Значение измеренной емкости должно соответствовать заводским нормам.

5.2.6. Проверка характеристик выключателя.

Определяются характеристики в соответствии с заводскими инструкциями. Результаты проверок и измерений должны соответствовать паспортным данным.

5.2.7. Испытание выключателя многократными опробованиями.

Производится при различных значениях давления сжатого воздуха в приводе и напряжения на выводах электромагнитов приводов так же, как и для воздушных выключателей. Выполняются операции и сложные циклы (В—О без выдержки времени между операциями — для всех выключателей; О—В и О—В—О — для выключателей, предназначенных для работы в режиме АПВ), число которых должно составлять: 3—5 операций В и О; 2—3 цикла каждого вида.

5.2.8. Испытание встроенных трансформаторов тока. Производится согласно п. 11.

5.3. Вакуумные выключатели

5.3.1. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов. Производится согласно п. 2.2.26.

5.3.2. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

1. Испытание изоляции выключателя. Значения испытательного напряжения принимаются согласно табл. 3. Испытания производятся по схемам рис. 12 с помощью установки, имеющей максимальную токовую защиту с уставкой по току утечки не более 20 мА.

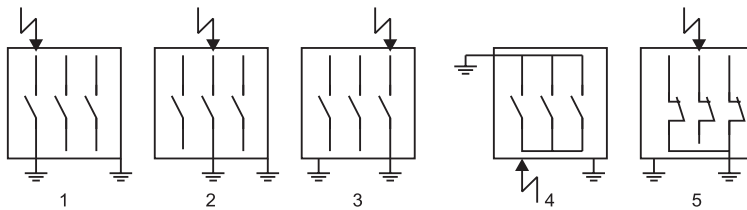


Рис. 12. Схемы испытаний электрической прочности изоляции вакуумных выключателей: 1, 2, 3 — полюсов и внутренней изоляции камер; 4 — изоляции между разомкнутыми контактами и нижних выводов относительно заземленной рамы; 5 — межполюсной изоляции

Необходимо иметь в виду, что пробой вакуумного промежутка сопровождается повышенным рентгеновским излучением. Поэтому при испытаниях выключателей вне КРУ для защиты от возможного облучения на расстоянии 0,5 м от выключателя должен устанавливаться защитный экран из стального листа толщиной не менее 2 мм или из стекла марки ТФ-5 толщиной не менее 12,5 мм. При испытаниях выключателя внутри КРУ защитным экраном служит его фасадная перегородка.

С целью тренировки дугогасительных камер напряжение на разомкнутых контактах постепенно повышается от нуля до номинального значения испытательного напряжения. При возникновении пробоев в камере подъем напряжения прекращают до их исчезновения. Повышение напряжения проводится двумя ступенями: до 40 % испытательного толчком и далее плавно со скоростью 1 кВ в секунду. Испытательное напряжение прикладывается в течение 1 мин, после чего за время не менее 5 с плавно понижается до 25 % и снимается.

2. Испытание изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Испытания проводятся согласно п. 2.56.

5.3.3. Измерение сопротивления постоянному току.

1. Токопроводящий контур. Сопротивление токопровода (между токопроводящими стержнями без розеточных контактов) выключателей ВВЭ-10 Минусинского завода должно быть не более:

60 мкОм (ВВЭ-10-20/630);

55 мкОм (ВВЭ-10-20/1000);

38 мкОм (ВВЭ-10-20/1600).

Предельные значения сопротивления каждого полюса выключателей Ровенского завода приведены в табл. 15.

Сопротивление токоведущего полюса выключателя типа ВВВ-10-2/320 должно быть не более 300 мкОм, типа ВВ/TEL-10(6) — не более 50 мкОм.

Таблица 15. Предельные значения сопротивления постоянному току токоведущего контура выключателей ВВЭ-10 Ровенского завода

| Тип выключателя | Сопротивление каждого полюса, мкОм, не более | |
|------------------|---|---|
| | между подвижными контактами главных цепей КРУ | между выводами без розеточных контактов |
| ВВЭ-10-20/630 | 65 | 45 |
| ВВЭ-10-31,5/630 | 65 | 40 |
| ВВЭ-10-20/1000 | 60 | 40 |
| ВВЭ-10-31,5/1000 | 60 | 40 |
| ВВЭ-10-20/1600 | 45 | 25 |
| ВВЭ-10-31,5/1600 | 45 | 25 |
| ВВЭ-10-31,5/2000 | 20 | 15 |
| ВВЭ-10-31,5/3150 | 20 | 15 |

2. Сопротивление постоянному току электромагнитов управления.

Значения сопротивления электромагнитов управления выключателей Минусинского завода, ПО «Полярон» и фирмы «Таврида-электрик» должны быть не выше предельных, указанных на табличке катушек электромагнитов. Сопротивления электромагнитов выключателей Ровенского завода должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 16.

Таблица 16. Нормы на сопротивление постоянному току катушек управления ВВЭ-10 Ровенского завода

| Номинальное напряжение катушки, В | Номинальный ток выключателя, А | Сопротивление, Ом |
|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------|
| Электромагнит включения | | |
| 110 | 630—1600 | 0,72 ±0,03 |
| | 2000, 3150 | 0,54 ±0,03 |
| 220 | 630—1600 | 2,50 ±0,12 |
| | 2000, 3150 | 1,92 ±0,03 |
| Электромагнит отключения | | |
| 110 | 630—3150 | 23,5 ±1,2 |
| 220 | 630—3150 | 97,0 ±0,14 |

5.3.4. Проверка минимального напряжения срабатывания выключателя.

Электромагниты управления должны срабатывать при напряжении не менее:

электромагниты включения $0,85U_{\text{ном}}$;
 электромагниты отключения $0,70U_{\text{ном}}$.

5.3.5. Измерение временных характеристик.

Временные характеристики должны соответствовать нормам, приведенным в табл. 17.

Таблица 17. Нормы временных характеристик вакуумных выключателей

| Характеристика | ВВЭ-10 | | ВВВ-10-2/320 | ВВ/TEL-10, ВВ/TEL-6 |
|---|--------|-------|--------------|---------------------|
| | М | Р | | |
| Собственное время отключения, с, не более | 0,03 | 0,055 | 0,08 | 0,01 |
| Собственное время включения, с, не более | 0,20 | 0,30 | — | 0,07 |
| Бестоковая пауза АПВ минимальная, с, не более | 0,30 | 0,30 | 0,40 | 0,30 |

Примечание. М — выключатели Минусинского завода, Р — выключатели Рижского завода.

5.3.6. Измерение сопротивления постоянному току, временных характеристик, хода подвижных частей и проверка одновременности замыкания контактов производится, если это требуется инструкцией завода-изготовителя.

5.3.7. Испытание выключателей многократными опробованиями.

Число операций и сложных циклов, выполняемых при номинальном напряжении на выводах электромагнитов, должно составлять:

3—5 операций включения и отключения;

2—3 цикла В—О без выдержки времени между операциями.

6. Выключатели нагрузки (ВН)

Полностью собранный и отрегулированный ВН испытывается в следующем объеме.

6.1. Измерение сопротивления изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления

Производится в соответствии с п. 2.2.2б.

6.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции выключателя. Производится в соответствии с табл. 3;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Производится в соответствии с п. 2.5б.

6.3. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактов выключателя. Измеряется сопротивление токоведущей системы полюса и каждой пары рабочих контактов. Значение сопротивления должно соответствовать данным предприятия-изготовителя;

б) обмоток электромагнитов управления. Значение сопротивления должно соответствовать данным предприятия-изготовителя.

6.4. Проверка срабатывания привода при пониженном напряжении

Производится в соответствии с 2.8.3.

6.5. Испытание ВН многократным опробованием

Производится в соответствии с п. 2.9.

6.6. Испытание предохранителей

6.6.1. Внешний осмотр и проверка.

Наружным осмотром устанавливают, не имеет ли патрон предохранителя каких-либо дефектов в изолирующих частях, контактах и крепежных деталях. Патроны с трещинами на фарфоре, нарушенной армировкой колпачков бракуются.

ВН типа ВНП комплектуются предохранителями с кварцевым заполнением (типа ПК). Плотность и полнота заполнения патрона кварцевым песком проверяется путем встряхивания: не должно быть слышно шума пересыпающегося песка.

Материал плавких вставок — медная проволока; не допускается применение проволок с «барашками» или перегибами. Номинальный ток плавкой вставки должен соответствовать номинальному току патрона предохранителя.

Номинальное напряжение предохранителя должно соответствовать номинальному напряжению сети. Применение предохранителя на меньшее напряжение может привести к отказу в гашении дуги и разрушению предохранителя, а в сети с большим напряжением может возникнуть перенапряжение при

отключении короткого замыкания (вследствие большой длины плавкой вставки), опасное для изоляции защищаемой электроустановки.

Исправность указателя срабатывания проверяется путем легкого нажатия на головку указателя. Исправный, незасоренный указатель свободно перемещается во втулке.

6.6.2. Испытание опорной изоляции предохранителей повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытательное напряжение устанавливается согласно табл. 3, как для нормальной керамической изоляции.

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин. Испытание может производиться одновременно с испытанием изоляторов ошиновки ячейки.

6.6.3. Проверка целостности плавких вставок и токоограничивающих резисторов.

Плавкие вставки должны быть калиброванными и соответствовать проектным данным. У предохранителей с кварцевым песком дополнительно проверяется целостность плавкой вставки. Ниже приводятся значения сопротивления плавких вставок предохранителей ПК, на которые можно ориентироваться при проверке (табл. 18).

Таблица 18. Технические данные предохранителей ПК

| Тип | Номинальное напряжение, кВ | Номинальный ток, А | | Сопротивление при 20 °С, Ом |
|--------------|----------------------------|--------------------|-----------------|-----------------------------|
| | | патрона | плавкой вставки | |
| ПК1-6-8/2 | 6 | 8 | 2 | 0,9300 |
| ПК1-6-20/10 | | 20 | 10 | 0,0352 |
| ПК1-6-32/32 | | 32 | 32 | 0,0475 |
| ПК1-10-8/2 | 10 | 8 | 2 | 1,0150 |
| ПК1-10-20/20 | | 20 | 20 | 0,0580 |
| ПК2-6-50/32 | 6 | 50 | 32 | 0,0318 |
| ПК2-6-50/50 | | | 50 | 0,0160 |
| ПК2-10-40/32 | 10 | 40 | 32 | 0,0388 |
| ПК3-6-100/80 | 6 | 100 | 80 | 0,0107 |
| ПК3-10-80/80 | 10 | 80 | 80 | 0,0145 |

7. Разъединители, отделители и короткозамыкатели

7.1. Измерение сопротивления изоляции:

а) поводков и тяг, выполненных из органических материалов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции должно быть не ниже значений, приведенных в п. 2.2.2а.

б) многоэлементных изоляторов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ только при положительных температурах окружающего воздуха. Сопротивление изоляции каждого подвесного фарфорового изолятора или каждого элемента штыревого изолятора должно быть не менее 300 МОм.

в) вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Производится в соответствии с п. 2.5б.

7.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты

а) изоляции разъединителей, короткозамыкателей и отделителей. Производится в соответствии с табл. 3;

б) изоляции вторичных цепей и обмоток электромагнитов управления. Производится в соответствии с п. 2.2.2б.

7.3. Измерение сопротивления постоянному току:

а) контактной системы разъединителей и отделителей между точками «контактный вывод — контактный вывод». Измеренные значения должны соответствовать данным предприятия-изготовителя или приведенным в табл. 19.

Таблица 19. Наибольшее допустимое сопротивление постоянному току контактной системы разъединителей и отделителей

| Тип разъединителя (отделителя) | Номинальный ток, А | Сопротивление, мкОм |
|--------------------------------|--------------------|---------------------|
| РЛН | 600 | 220 |
| Остальные типы | 600 | 175 |
| | 1000 | 120 |
| | 1500—2000 | 50 |

б) обмоток электромагнитов управления. Значения сопротивления обмоток должны соответствовать данным предприятий-изготовителей.

7.4. Проверка работы

Проверку аппаратов с ручным управлением следует производить путем выполнения 5 операций включения и 5 операций отключения. Аппараты с дистанционным управлением проверяются выполнением такого же числа операций включения и отключения при номинальном напряжении на выводах электромагнитов и электродвигателей управления.

7.5. Определение временных характеристик

Производится у короткозамыкателей при включении и у отделителей при отключении. Измеренные значения должны соответствовать данным предприятия-изготовителя, а при их отсутствии — данным, приведенным в табл. 20.

Таблица 20. Наибольшее допустимое время отключения отделителей и включения короткозамыкателей

| Тип аппарата | Время отключения, с, не более | Тип аппарата | Время включения, с, не более |
|--------------|----------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| Отделители | | Короткозамыкатели | |
| ОД-35 | 0,5 | КЗ-35 | 0,4 |
| ОД-110 | 0,7—0,9 | КЗ-110 | 0,4 |
| ОД-110М | 0,5 | КЗ-110М | 0,35 |

8. Реакторы

Наиболее широко используются *сухие* реакторы в сетях 6 и 10 кВ. Они выполняются в виде обмотки из изолированного провода, закрепленной на бетонных колоннах. Монтируются с вертикальным, горизонтальным или ступенчатым расположением фаз, в отдельных камерах распределительного устройства. В сетях более высоких напряжений применяются реакторы с *масляной* изоляцией, с каркасом стержневой или тороидальной формы из изоляционного материала и стальным баком. Реакторы различают: по исполнению — одинарные и сдвоенные, по месту включения — секционные и линейные, по характеристикам — с линейной или нелинейной характеристикой, управляемые и неуправляемые. Сухие бетонные реакторы относятся к неуправляемым реакторам с линейной характеристикой.

Масляные реакторы и заземляющие дугогасящие реакторы (дугогасящие катушки) испытываются по нормам для силовых трансформаторов.

Сухие токоограничивающие реакторы испытываются в объеме, указанном ниже. Перед испытаниями проверяют правильность монтажа реактора: при вертикальной установке нижняя (Н), средняя (С) и верхняя (В) фазы должны соответствовать заводским обозначениям, а средняя фаза присоединяется так, чтобы ток в ее обмотке протекал в направлении, противоположном направлению тока в крайних фазах.

8.1. Измерение сопротивления изоляции обмоток относительно болтов крепления.

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм.

8.2. Испытание опорной изоляции реакторов повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытательное напряжение опорной изоляции полностью собранного реактора устанавливается согласно табл. 28.

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин. Испытание опорной изоляции сухих реакторов может производиться совместно с изоляторами ошиновки ячейки. Перед испытанием следует убедиться в отсутствии трещин в бетоне и в его лаковом покрове, целости и чистоте изоляторов, проверить состояние витков реактора. При появлении шума, дребезжания, тресков и пр., свидетельствующих о неисправном состоянии реактора, испытание следует прекратить.

9. Разрядники

У трубчатых разрядников проверка ограничивается осмотром поверхности перед его установкой на опору и измерением внешнего искрового промежутка на опоре установки разрядника. На поверхности разрядника не должно быть трещин и отслоений, а искровой промежуток не должен отличаться от заданного (табл. 21).

Таблица 21. Размеры внешнего искрового промежутка трубчатых разрядников

| Тип разрядника | РТФ-6 | РТВ-6 | РТФ-10 | РТВ-10 | РТФ-35 | РТВ-35 | РТВ-110 |
|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|
| Внешний искровой промежуток, мм | 20 | 10 | 25 | 15 | 130 | 100 | 450 |

Вентильные разрядники до испытания тщательно осматриваются на отсутствие трещин и сколов в армировочных швах и фарфоровых покрышках, а также видимых нарушений герметичности разрядника. Армировочный шов должен иметь надежное защитное покрытие; при осторожном проворачивании разрядника не должны наблюдаться шумы, потрескивания или перемещения элементов. Испытания вентильных разрядников производят при температуре наружного воздуха не ниже +10 °С, при более низких температурах разрядник прогревают в теплом помещении или с помощью воздуходувки. После установки вентильных разрядников на месте монтажа производятся следующие испытания.

9.1. Измерение сопротивления разрядников и ограничителей перенапряжений

Производится на разрядниках и ограничителях перенапряжений с номинальным напряжением менее 3 кВ мегаомметром на напряжение 1 кВ, на разрядниках и ограничителях перенапряжений с номинальным напряжением 3 кВ и выше — мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление разрядников типа РВО (разрядник вентильный, облегченный для защиты оборудования подстанций напряжением до 35 кВ), РВН, РВП, CZ должно быть не менее 1000 МОм. Сопротивление элементов разрядников РВС должно соответствовать заводской инструкции.

Сопротивление вентильных разрядников (элементов) типа РВМ в зависимости от номинального напряжения должно быть:

| Номинальное напряжение, кВ | Сопротивление, МОм | |
|----------------------------|--------------------|----------|
| | не менее | не более |
| 3 | 15 | 40 |
| 6 | 100 | 250 |
| 10 | 170 | 450 |
| 15 | 600 | 2000 |
| 20 | 1000 | 10 000 |

Разрядник РВМ-35 состоит из двух основных элементов с сопротивлением 600—2000 МОм, разрядник РВМГ на 110 кВ — из трех элементов с сопротивлением от 400 до 2500 МОм.

Сопротивление ограничителей перенапряжений с номинальным напряжением до 3 кВ должно быть не менее 1000 МОм, с номинальным напряжением 3—35 кВ должно соответствовать требованиям заводских инструкций. Сопротивление ограничителей перенапряжений с номинальным напряжением 110 кВ и выше должно быть не менее 3000 Ом и не отличаться более чем на $\pm 30\%$ от паспортных данных. При повышенной влажности окружающей среды измерение проводят с применением экрана.

9.2. Измерение тока проводимости (тока утечки)

Измерение тока проводимости позволяет выявить увлажнение внутренних деталей разрядников и ограничителей перенапряжений, ухудшение характеристик нелинейных резисторов ограничителей перенапряжений из-за нарушения герметичности или по другим причинам.

Разрядники каждой фазы монтируются в колонну из отдельных элементов. Для более равномерного распределения напряжения между ними рекомендуется комплектовать фазы так, чтобы значения токов проводимости элементов (табл. 22) в одной фазе не различались более чем на 30—35 %.

Таблица 22. Допустимые значения тока проводимости (утечки) вентильных разрядников и пробивное напряжение искровых промежутков при выпрямленном напряжении и температуре 20 °С

| Тип разрядника или элемента | Испытательное выпрямленное напряжение, кВ | Ток проводимости при температуре разрядника 20 °С, мкА | Пробивное напряжение, кВ |
|------------------------------|---|--|--------------------------|
| РВН-1 | 1 | | 2,1—2,8 |
| РВВМ-3(6, 10) | 4 (6, 10) | 400—620 | — |
| РВС-15(20, 35) | 16 (20, 32) | 200—340 | 35—103 |
| РВС-33 | 32 | 450—620 | 35—103 |
| РВО-3(6, 10) | 4(6, 10) | 10 | 9—30,5 |
| РВО-35 | 42 | 70—130 | 78—98 |
| РВМ-3 | 4 | 380—450 | — |
| РВМ-6 | 6 | 120—220 | 14—19 |
| РВМ-10 | 10 | 200—280 | 24—32 |
| РВМ-15 | 18 | 500—700 | 33—45 |
| РВМ-20 | 28 | 500—700 | 45—59 |
| РВРД-3(6, 10) | 3 (6, 10) | 30—85 | 7,5—30 |
| РВП-3* | 4 (6, 10) | — | — |
| РВП-6(10)* | 6 (10) | — | 16—30,5 |
| Элемент разрядника РВМГ-110 | 30 | 900—1300 | — |
| Элемент разрядника РВМГ-110М | 30 | 1000—1350 | 60,5—72,5 |

* У разрядников типа РВП нормируется верхний предел тока утечки 10 мкА.

** Для приведения токов проводимости к температуре 20° вносят поправку 3 % на каждые 10° отклонения (при температуре выше 20° поправка отрицательная).

Измерение тока утечки производят у разрядников с шунтирующими сопротивлениями по схеме рис. 13. Конденсатор С применен здесь для сглаживания пульсаций выпрямленного тока; емкость 0,2 мкФ обеспечивает измерение токов практически всех встречающихся разрядников; при двухполупериодном выпрямлении можно ограничиться значением 0,1 мкФ.

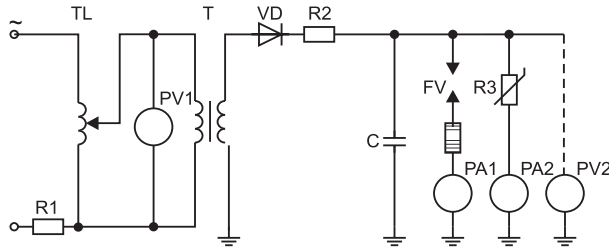


Рис. 13. Схема измерения тока проводимости вентильного разрядника: R1 — защитный резистор; TL — регулировочный трансформатор; Т — испытательный трансформатор; PV1 — вольтметр; VD — выпрямитель; R2 — токоограничивающий резистор; R3 — добавочный резистор с нелинейной вольт-амперной характеристикой (типа СН); С — сглаживающий конденсатор; FV — испытуемый элемент разрядника; PA1, PA2 — микроамперметры; PV2 — киловольтметр для градуировки вольтметра PV1

Для измерения токов используются магнитоэлектрические микроамперметры с пределом измерения до 1,5 мА класса точности 0,5. Для измерения выпрямленного напряжения применяются киловольтметры электростатической системы (С96, С100 и др.) или микроамперметры класса точности 0,5 с добавочным резистором. Значение испытательного напряжения можно контролировать также по вольтметру PV1 в первичной цепи, предварительно отградуированному с помощью киловольтметра PV2. Пересчитывать показания вольтметра PV1 по коэффициенту трансформации нежелательно, так как при этом не учитываются искажение формы кривой напряжения и падение напряжения в обмотках трансформаторов и в защитных резисторах. Следует иметь в виду, что изменение испытательного выпрямленного напряжения на 1 кВ может привести к изменению тока проводимости на 100—120 мкА.

Сопротивление резистора R_2 (кОм) выбирается из соотношения

$$R_2 > U_{\text{исп}}/0,1,$$

где $U_{\text{исп}}$ — значение испытательного напряжения, кВ.

Измерение тока проводимости ограничителей перенапряжений производится с помощью миллиамперметра переменного тока на напряжении промышленной частоты по схеме рис. 14. Значение испытательного напряжения для ограничителей класса напряжения 3—110 кВ принимается равным наибольшему длительно допустимому фазному напряжению. Предельные значения тока проводимости должны соответствовать паспортным данным, например 1,5 мА для ОПН-110.

9.3. Измерение пробивных напряжений при промышленной частоте

Пробивное напряжение искровых промежутков элементов вентильных разрядников должно быть в пределах значений, указанных в табл. 22.

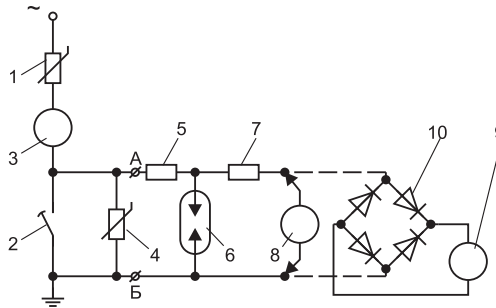


Рис. 14. Схема измерения тока проводимости ограничителей перенапряжений: 1 — ограничитель перенапряжений; 2 — нож заземления; 3 — регистратор срабатывания; 4 — защитный нелинейный резистор; 5, 7 — резисторы 15 кОм, 2 Вт; 6 — защитный разрядник; 8 — миллиамперметр переменного тока; 9 — миллиамперметр постоянного тока; 10 — диод на ток 10 мА; АБ — зажимы для подключения измерительной схемы

Измерение пробивных напряжений у разрядников с шунтирующими резисторами допускается производить на испытательной установке, позволяющей ограничивать ток через разрядник до 0,1 А и время приложения напряжения до 0,5 с.

При измерении пробивных напряжений вентильных разрядников с шунтирующими резисторами необходимо соблюдать следующие условия:

- а) время подъема напряжения должно быть не более 0,5 с и не менее 0,1 с;
- б) интервал между отдельными измерениями должен быть не менее 10 с и не более 1 мин;
- в) напряжение и мощность испытательного трансформатора и регулирующего устройства должны обеспечивать возможность подъема напряжения на разряднике до 120 % верхнего предела пробивного напряжения. Мощность испытательного трансформатора и регулирующего устройства должна быть не менее 5 кВ · А для разрядников РВС и 25 кВ · А для разрядников с магнитным гашением дуги РВМГ;

- г) после измерения пробивного напряжения должны быть измерены токи проводимости разрядников с целью контроля целостности шунтирующих резисторов.

Превышение допустимого времени подъема напряжения, применение трансформаторов недостаточной мощности или напряжения может привести к перегреву и разрушению шунтирующих резисторов, если подъем напряжения до максимально возможного не завершится пробоем, так как значения предпробивных токов в резисторах в 100—150 раз превышают ток проводимости при испытаниях выпрямленным напряжением.

Для измерения пробивного напряжения используют электронно-лучевые осциллографы с емкостным делителем напряжения или светолучевые осциллографы с резисторным делителем.

За пробивное напряжение принимается среднее из нескольких измерений, не менее 3 — для разрядников серии РВС, 5 — РВРД, 10 — РВМ, РВМГ.

10. Измерительные трансформаторы напряжения (ТВ) (электромагнитные)

10.1. Краткие сведения

Условные обозначения: З — один вывод заземляется; О — однофазный; Т — трехфазный; К — каскадный или с компенсационной обмоткой; Ф — с фарфоровой наружной изоляцией; М — масляный; С — сухой (с воздушной изоляцией); Е — емкостный; Д — делитель.

Выводы первичной обмотки (ВН) имеют обозначения А, Х для однофазных и А, В, С, N для трехфазных трансформаторов. Выводы основной вторичной обмотки (НН) имеют соответственно обозначения а, х и а, в, с, N, выводы вторичной дополнительной обмотки — a_d и x_d . Начала первичных и вторичных обмоток присоединяются соответственно к выводам А, В, С и а, в, с.

Основные вторичные обмотки соединяются обычно в звезду (группа соединения 0), дополнительные — по схеме разомкнутого треугольника.

Как известно, в нормальном режиме работы сети напряжение на зажимах дополнительной обмотки близко к нулю (напряжение небаланса $U_{нб} = 1-3$ В), а при замыканиях на землю равно утроенному значению $3U_0$ напряжения нулевой последовательности U_0 фазы. В сети с заземленной нейтралью максимальное значение $3U_0$ равно фазному напряжению, с изолированной — утроенному фазному напряжению. Соответственно дополнительные обмотки выполняются на номинальное напряжение $U_{ном} = 100$ В и $100/3$ В.

Номинальным напряжением ТВ называется номинальное напряжение его первичной обмотки; это значение может отличаться от класса изоляции. Номинальное напряжение вторичной обмотки принимается равным 100, $100/\sqrt{3}$ и $100/3$ В. Как правило, трансформаторы напряжения работают в режиме холостого хода.

10.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) первичных обмоток. Производится мегаомметром на 2500 В. Сопротивление изоляции обмотки ВН класса напряжения до 3—35 кВ должно быть не ниже 100 МОм, 110 кВ — 300 МОм. При измерении первичная обмотка трансформатора должна быть отсоединена от земли, а выводы вторичных обмоток и корпус (цоколь) объединены и заземлены (рис. 15);

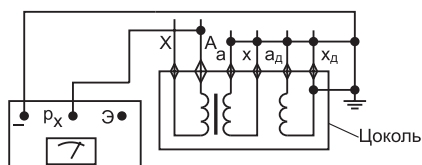


Рис. 15. Схема измерения сопротивления изоляции первичных обмоток трансформаторов напряжения

б) вторичных обмоток. Производится мегаомметром на напряжение 1000 В. Сопротивление изоляции вторичных обмоток вместе с подсоединенными к ним цепями должно быть не менее 1 МОм, при отключенных вторичных цепях — не менее 50 МОм.

10.3. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции первичных обмоток. Значения испытательного напряжения для ТВ с изоляцией всех выводов обмотки ВН на номинальное напряжение указаны в табл. 23. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин.

Измерения допускается производить как на стороне ВН с помощью киловольтметра, так и на стороне НН испытательного трансформатора с пересчетом по коэффициенту трансформации;

Таблица 23. Значения испытательного напряжения для основной изоляции трансформаторов напряжения

| Исполнение изоляции измерительного трансформатора | Испытательное напряжение (кВ) при номинальном напряжении аппарата, кВ | | | | | |
|---|---|------|------|------|------|------|
| | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 | 35 |
| Нормальная органическая | 21,6 | 28,8 | 37,8 | 49,5 | 58,5 | 85,5 |
| Фарфоровая | 24 | 32 | 42 | 55 | 65 | 95 |

б) изоляции вторичных обмоток. Значение испытательного напряжения для изоляции вторичных обмоток вместе с присоединенными к ним цепями принимается равным 1 кВ, продолжительность приложения испытательного напряжения — 1 мин. Заземление вторичных цепей (как глухое, так и через пробивные предохранители) на время испытаний отсоединяется.

Вторичные цепи, содержащие электронные элементы, при испытании трансформатора рекомендуется отсоединять. Необходимость испытания таких цепей повышенным напряжением, вид и значение испытательного напряжения определяются заводскими инструкциями.

10.4. Измерение тока и потерь холостого хода.

Производится согласно заводской инструкции. Измеренные значения не должны отличаться от указанных в паспорте более чем на 10 %. Это испытание позволяет выявить витковые замыкания в обмотках.

Испытание производится обычно на вторичной обмотке при номинальном напряжении. Измерительная аппаратура (регулирующее устройство) должна быть рассчитана на длительное протекание тока не менее 30 А. Для регулировки тока рекомендуется применять нагрузочный реостат.

При испытаниях необходимо принять соответствующие меры безопасности в связи с тем, что на выводах первичной обмотки трансформатора будет наводиться номинальное напряжение. Кроме того, надо следить, чтобы ток во вторичной обмотке ТВ не превышал значений, определяемых его максимальной мощностью.

10.5. Проверка полярности выводов (у однофазных) или группы соединений (у трехфазных) TV

Производится при монтаже, если отсутствуют паспортные данные или есть сомнение в достоверности этих данных. Полярность и группа соединений обмоток TV должны соответствовать паспортным данным.

Проверку производят путем подачи импульсов постоянного тока на обмотку ВН трансформатора; к обмотке НН подключается гальванометр.

В качестве источника постоянного тока используются сухие элементы или аккумуляторные батареи на напряжение не более 12 В, в качестве гальванометра — милливольтметры магнитоэлектрической системы. Если положительные зажимы источника и прибора подключены к одноименным зажимам обмоток трансформатора (например, А и а), то при замыкании цепи тока стрелка прибора должна отклониться вправо, при размыкании или неверной полярности одной из обмоток — влево.

Проверка полярности выводов обмоток у трехфазных TV выполняется по схемам рис. 16.

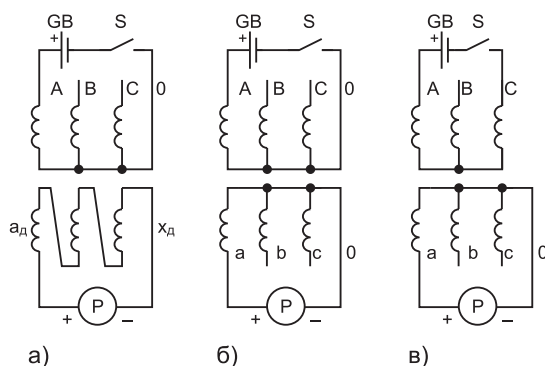


Рис. 16. Схемы проверки полярности выводов трехфазных трансформаторов напряжения с соединением обмоток: а — звезда с нулем — разомкнутый треугольник; б — звезда—звезда с выведенными нулевыми точками; в — звезда—звезда с выведенной нулевой точкой вторичной обмотки

По схеме рис. 16а прибор Р подсоединяется к выводам а и х, а положительный полюс (+) источника тока GB поочередно подключается к выводам А, В и С; при замыкании ключа S стрелка прибора Р должна отклоняться вправо. В схеме рис. 16б стрелка прибора в момент замыкания ключа отклонится вправо, если зажимы (+) источника и прибора подключены к зажимам А и а, влево — если «плюс» прибора соединен с выводами b или с. Согласно рис. 16в «минус» прибора постоянно подсоединен к выводу нейтрали, а «плюс» поочередно подключается к выводам а, b и с вторичной обмотки TV. Источник при этом подключают к выводам АВ, ВС и СА первичной обмотки трансформатора так, что «плюс» его соединяется с выводами А, В и С, а «минус» — с выводами В, С и А соответственно. Тогда при правильной полярности выводов обмоток стрелка прибора в момент замыкания цепи отклонится: вправо, если прибор подсоединен «плюсом» к выводу а; влево — к выводу с и

не отклонится или отклонится незначительно при подключении «плюса» прибора к выводу *b*.

10.6. Измерение сопротивления обмоток постоянному току

Согласно ПУЭ, требуется только у связующих обмоток каскадных TV. Выполняется омметром любого типа. Отклонение измеренного значения сопротивления обмотки от паспортного или от сопротивления обмоток других фаз не должно превышать 2 %.

10.7. Проверка вторичных цепей

10.7.1. Проверка нагрузки. Класс точности, в котором фактически работает трансформатор напряжения, зависит от нагрузки его вторичной цепи. Нагрузка предварительно может быть определена расчетным путем, в смонтированной схеме — непосредственным измерением фазных значений тока и напряжения. Данные по нагрузке и классу точности основных типов TV приведены в табл. 24, где указаны также значения напряжения короткого замыкания u_k % между первичной и вторичной (основной) обмотками, отнесенные к максимальной мощности. Максимальную мощность трансформатор может длительно выдавать, работая без перегрева обмоток, но вне классов точности.

Таблица 24. Технические данные трансформаторов напряжения

| Тип | Номинальное напряжение, кВ | Номинальная мощность, В · А, для классов точности | | | | Максимальная мощность, В · А | Напряжение КЗ, u_k , % |
|---------------------------|----------------------------|---|-----|-----|-----|------------------------------|--------------------------|
| | | 0,2 | 0,5 | 1 | 3 | | |
| НОС-0,5 | 0,38 | — | 25 | 50 | 100 | 200 | 4,4 |
| | 0,5 | — | 25 | 50 | 100 | 200 | 4,2 |
| НОМ-10 | 10 | — | 75 | 150 | 300 | 640 | 6,4 |
| НОМ-35 | 35 | — | 150 | 250 | 600 | 1200 | 3,87 |
| НОЛ.08-10 | 10 | 50 | 75 | 150 | 300 | 640 | 4,95 |
| НТС-0,5 | 0,38(0,5) | — | 50 | 75 | 200 | 400 | 3,76 |
| НТМК-10 | 10 | — | 120 | 200 | 500 | 960 | 3,07 |
| НТМИ-10 | 10 | — | 120 | 200 | 500 | 960 | 5,0 |
| ЗНОЛ 09-10, ЗНОЛ 06-10 | 10/3 | 50 | 75 | 150 | 300 | 640 | 4,8 |
| ЗНОМ-15-2 | 10/3 | — | 75 | 150 | 300 | 640 | 4,63 |
| ЗНОМ-35-65 | 35/3 | — | 150 | 250 | 600 | 1200 | 6 |
| НКФ-110-57 | 110/3 | — | 400 | 600 | 200 | 2000 | 4,05 |

Цифра, обозначающая класс точности, соответствует предельно допустимому значению погрешности напряжения. Трансформаторы напряжения, питающие расчетные счетчики и измерительные приборы классов 1 и 1,5, должны иметь класс точности 0,5; для щитовых вольтметров требуется обычно класс 1, для релейной защиты — класс 3. У дополнительных обмоток устанавливается только класс 3.

10.7.2. Определение сопротивлений z трансформатора и проводов.

Значения этих сопротивлений требуются при расчете токов КЗ и потерь напряжения во вторичных цепях.

Измерение сопротивления проводов и жил кабеля может производиться омметром любого типа.

Сопротивление обмоток TV измеряется на переменном токе. Напряжение U на первичной обмотке однофазного TV плавно увеличивают до тех пор, пока ток I во вторичной обмотке, замкнутой на амперметр, не достигнет номинального (для данного класса точности) значения; тогда

$$Z_k = U_1/I_2 \times n,$$

где n — коэффициент трансформации.

У трехфазных TV с выведенными нулевыми точками измерение производится аналогично, поочередно для каждой фазы. При изолированной нейтрали напряжение подается на выводы двух фаз первичной обмотки, а одноименные выводы вторичной обмотки подключаются к амперметру; в этом случае сопротивление одной фазы равно половине измеренного значения. Измерения производят между фазами АВ, ВС и СА поочередно и среднее из трех значений принимают за расчетное.

Когда осуществить питание трансформатора со стороны ВН невозможно из-за отсутствия необходимой аппаратуры, подают питание на вторичную обмотку, а первичную закорачивают. Чтобы определить таким методом сопротивление обмотки разомкнутого треугольника, следует результат измерения поделить на три. При испытании необходимо учитывать особую опасность, которая может возникнуть в случае разрыва цепи первичной обмотки. Класс точности измерительных приборов должен быть не ниже 0,5.

10.7.3. Проверка схем включения TV.

Эта проверка выполняется под рабочим напряжением.

На ближайшей к трансформатору клеммной сборке измеряется напряжение на всех выводах вторичной обмотки попарно и относительно земли. Если фазные и междуфазные напряжения симметричны, а в цепи разомкнутого треугольника с напряжением $3U_0$ действует только напряжение небаланса $U_{нб} = 1-3$ В, то в схеме нет неправильно включенных (с обратной полярностью) обмоток.

Для проверки маркировки фаз производят пофазное отключение напряжения со стороны ВН трансформатора или используют фазоуказатель. В первом случае напряжение на отключенной фазе или исчезает, или резко снижается.

Вместо стороны ВН можно отключать вторичные цепи непосредственно на выводах НН трансформатора, но при этом повышается вероятность ошибки.

Применение фазоуказателя требует заземления фазного вывода во вторичной цепи (обычно заземляют вывод б). Так как наименование заземленной фазы известно, то, определив порядок чередования фаз, нетрудно проверить правильность их обозначения.

В сетях 35 кВ и выше часто применяют однофазные трансформаторы с двумя вторичными обмотками, соединенными в звезду и в разомкнутый треугольник. Правильность сборки схемы разомкнутого треугольника проверяется с помощью векторной диаграммы напряжений, по которой определяется положение вектора напряжения нулевой последовательности $3U_0$ относительно векторов напряжения звезды. Напряжение $3U_0$ создается путем исключения напряжения одной из фаз дополнительной обмотки. Вектор $3U_0$ должен находиться в противофазе с вектором напряжения фазы, исключенной из разомкнутого треугольника.

Проверка производится следующим образом (рис. 17). На трансформаторе одной из фаз, обычно фазы А, отсоединяют жилу кабеля от вывода x_d дополнительной обмотки и подключают ее к выводу a_d той же обмотки (рис. 17а). Таким образом исключается напряжение фазы А и имитируется режим однофазного короткого замыкания в ней. Вольтметром поочередно измеряется напряжение $U_{ф-д}$ ($U_{N-д}$) между выводом a_d дополнительной и выводами фаз а, б, с и нейтри основной вторичной обмотки (звезды).

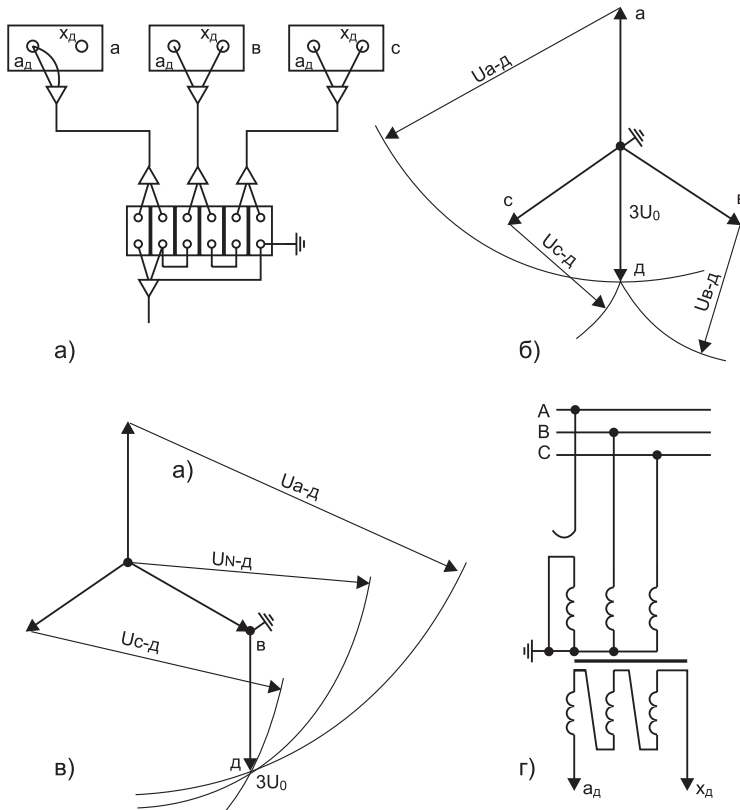


Рис. 17. Определение положения вектора $3U_0$

Графически эти напряжения можно представить разностью векторов напряжений фаз и вектора напряжения $3U_0$ (относительно земли):

$$U_{\text{ф-д}} = U_{\text{ф}} - 3U_0 \quad \text{и} \quad U_{\text{N-д}} = U - 3U_0.$$

Для определения положения вектора $3U_0$ строится звезда фазных напряжений, заземленные точки звезды и треугольника совмещаются. Из концов векторов напряжений звезды проводятся дуги окружностей, радиус каждой из которых равен длине соответствующего вектора $U_{\text{ф-д}}$ ($U_{\text{N-д}}$). Точка пересечения трех дуг является концом вектора $3U_0$, начало которого находится в заземленной точке: в нейтрали звезды (рис. 17б) или в конце вектора напряжения фазы b (рис. 17в).

В сетях 6 и 10 кВ применяют трехфазные (пятистержневые) ТВ, например типа НТМИ, где исключить фазу на вторичной стороне невозможно. В этом случае отключают фазу А с первичной стороны и замыкают накоротко, чтобы исключить ее сопротивление.

Предел измерения вольтметра должен быть выбран на двойное линейное напряжение. Инструментально положение вектора $3U_0$ можно определить с помощью фазометра (например, прибором ВАФ-85).

10.7.4. Фазировка.

При наличии на подстанции двух или более ТВ предусматривается переключение цепей защиты, автоматики и измерений с одного трансформатора на другой. Цель фазировки — убедиться в том, что при таком переключении к реле и измерительным приборам подводятся одни и те же фазы напряжения от разных трансформаторов. Для фазировки необходимо предварительно соединить вторичные обмотки ТВ в одной точке. По соображениям безопасности такое соединение создается обычно путем заземления одноименных выводов обмоток.

Измеряют вольтметром напряжение между каждым выводом одного трансформатора и всеми выводами другого. Для одноименных фаз напряжение должно быть равно нулю, для разных — линейному напряжению.

Подобные измерения повторяют на всех реле-повторителях, рубильниках, блок-контактах и прочих переключающих аппаратах.

10.8. Проверка заземления

Заземляемые выводы обмоток ВН трансформаторов должны соединяться непосредственно с контуром заземления; баки заземляются отдельно.

Заземление вторичных обмоток ТВ (глухое или через пробивной предохранитель) должно устанавливаться на ближайшей клеммной сборке или на зажимах ТВ; рекомендуется выполнять проводом сечением не менее 4 (медь) или 6 кв. мм (алюминий), так же как и соединение фазы b отдельных ТВ с заземляемой на щите общей шинкой. Для надежности заземление шинки следует выполнять на трех-пяти соседних панелях.

Вторичные обмотки, питающие оперативные цепи, заземляются через пробивные предохранители на напряжение пробоя 700—1000 В. Исправность пробивных предохранителей проверяется мегаомметром на 500 В.

11. Трансформаторы тока (ТА)

11.1. Краткие сведения

11.1.1. Основные параметры и режимы работы.

Наиболее распространенным видом ТА являются электромагнитные трансформаторы переменного тока, испытываемые согласно ПУЭ.

Первичная обмотка ТА включается последовательно в цепь измеряемого тока (в рассечку токопровода), вторичная замыкается на низкоомную нагрузку (токовые обмотки измерительных приборов, реле и др.). По выполнению первичной обмотки различают одновитковые и многовитковые ТА. Одновитковые ТА имеют две разновидности: с собственной первичной обмоткой и без нее; последние выполняются встроенными, шинными или разъемными. У встроенного ТА роль первичной обмотки выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. В шинном ТА первичной обмоткой служат одна или несколько шин РУ. Магнитопровод разъемного ТА состоит из двух частей, которые могут размыкаться или смыкаться вокруг проводника с током. Многовитковые ТА изготавливаются с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод.

Первичная цепь всегда имеет индекс 1, вторичная — 2. Номинальный ток вторичных обмоток 5 А, реже — 1 А (применяют при большом удалении присоединяемых приборов и реле и, как правило, для ТА с номинальным первичным током до 4000 А). Вторичная нагрузка ТА характеризуется полным сопротивлением его внешней вторичной цепи с указанием коэффициента мощности или полной мощностью при данном коэффициенте мощности и номинальном вторичном токе. Вторичная нагрузка ТА (с коэффициентом мощности 0,8), при которой гарантируется установленный класс точности или предельная кратность первичного тока, называется номинальной. Соответствующие значения номинальной вторичной нагрузки определяются выражением

$$Z_{2н} = S_{2н}/I_{2н}^2,$$

где $Z_{2н}$ — номинальное сопротивление (Ом); $S_{2н}$ — номинальная мощность нагрузки (В · А).

Коэффициент трансформации ТА — это отношение первичного тока к вторичному. Различают действительный $n = I_1/I_2$ и номинальный $n_n = I_{1н}/I_{2н}$ коэффициенты трансформации; разница характеризуется классом точности ТА.

Как правило, трансформаторы тока работают в режиме короткого замыкания. При протекании тока I_1 по первичной обмотке в магнитопроводе создается магнитный поток Φ_1 , ток I_2 создает поток Φ_2 . Так как угол между векторами этих потоков близок к 180° , в результате их геометрического сложения в магнитопроводе устанавливается результирующий магнитный поток

$\Phi_0 = \Phi_1 - \Phi_2$, составляющий при $I_1 = I_n$ несколько процентов (1—3 %) потока Φ_1 (индукция порядка 0,1 Т) и индуцирующий небольшую ЭДС в замкнутой вторичной обмотке.

Если по какой-либо причине цепь нагрузки разрывается, магнитный поток Φ_2 исчезает, весь поток Φ_1 становится намагничивающим (индукция до 1,5—1,8 Т) и вторичная ЭДС резко возрастает, достигая иногда нескольких киловольт и даже более при номинальном первичном токе. Этот режим является весьма опасным в связи с возможностью электропоражения людей и пожара на трансформаторе. ТА, амплитуда напряжения на разомкнутой вторичной обмотке которых при номинальном первичном токе превышает 350 В, должны иметь предупреждающую надпись.

11.1.2. Погрешность.

За счет тока намагничивания действительный вторичный ток получается меньше, чем приведенный первичный ток I_1/n (*токовая погрешность*), и смещается относительно него по фазе на некоторый угол (*угловая погрешность*). Токовая погрешность численно выражается в процентах:

$$f = \frac{I_2 - I_1/n_n}{I_1/n_n} \cdot 100 \%,$$

где I_1 и I_2 — действительные значения первичного и вторичного токов. Эту же погрешность можно выразить через вторичные токи и номинальные параметры:

$$f = \frac{I_2 - I_{2n}}{I_{2n}} \cdot 100 \%.$$

Следовательно, номинальная токовая погрешность представляет собой алгебраическую разность вторичных токов — действительного и номинального, отнесенную к номинальному вторичному току. Погрешность всегда имеет отрицательный знак, ее абсолютное значение уменьшается с увеличением первичного тока до 100—120 % номинального, а при большей кратности начинает возрастать (рис. 18).

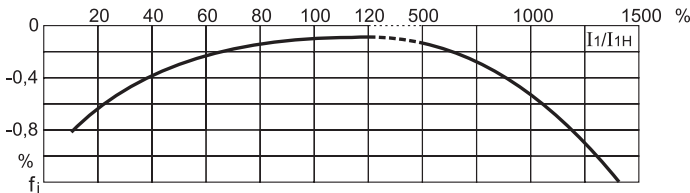


Рис. 18. Зависимость токовой погрешности трансформатора тока от кратности первичного тока

С увеличением сопротивления (с уменьшением мощности) нагрузки погрешность возрастает. Класс точности 0,2; 0,5; 1,0; 3,0; 5; 10 и Р (для релейной защиты) характеризует предельные погрешности ТА при различных значениях тока в первичной обмотке и нагрузке. Число, обозначающее класс

точности, соответствует предельной допустимой токовой погрешности при номинальном токе. Нижний предел вторичной нагрузки S_2 при $\cos\varphi = 0,8$ для трансформаторов с $I_n = 5$ А составляет 1,25; 3,75; 15 В · А и выше при $S_2 = 2,5$; 5 и 10; 60 В · А и выше соответственно. Для трансформаторов с $I_n = 1$ А нижний предел S_2 составляет 40—50 % S_n .

Различают также полную погрешность ε , которая определяется не алгебраической, как f , а геометрической разностью между приведенным первичным и вторичным токами (током намагничивания), причем $\varepsilon \geq f$.

Для оценки точности работы ТА в схемах релейной защиты в основном используется параметр ε , так как он непосредственно характеризует намагничивающий ток (для токовых дифференциальных, нулевой последовательности и некоторых других защит). В некоторых случаях, например для дистанционных и максимальных токовых защит, реагирующих на полные токи фаз, важна погрешность f . Учитывают, однако, что при удовлетворительных значениях ε требования в отношении f тем более выполняются.

В отличие от целей измерения, для релейной защиты необходимая точность должна быть обеспечена при токах повреждения, во много раз превышающих номинальные значения первичного тока. Для большинства защит допускается погрешность по току не более 10 % и по углу до 7° . Кривые 10 %-ной погрешности дают зависимость максимальной кратности первичного тока $m = I/I_n$ от сопротивления нагрузки Z_n вторичной цепи при полной погрешности 10 % и $\cos\varphi = 0,8$ (рис. 19). Зная кратность первичного тока при конкретном виде аварии, можно по этим кривым определить допустимое сопротивление нагрузки, и наоборот, зная (или измерив) действительное сопротивление нагрузки, определить допустимую кратность тока, при которой токовая погрешность не превысит 10 %.

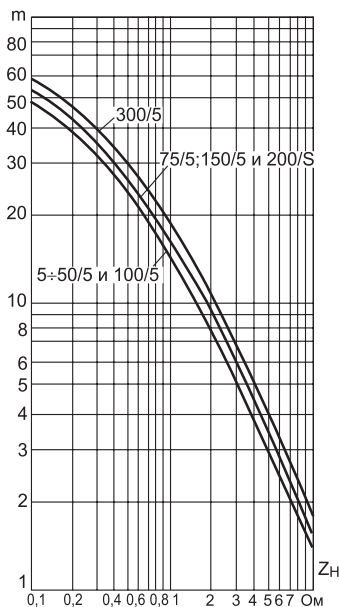


Рис. 19. Кривые 10 %-ной погрешности трансформатора тока типа ТПФ

Необходимо учитывать, что в этом режиме ТА работает у точки перегиба характеристики намагничивания, т. е. достигает насыщения магнитопровода. Поэтому даже небольшое отклонение действительного тока от расчетного значения может вызвать резкое возрастание тока намагничивания и, как следствие, увеличение погрешности. При большой длине соединительных проводов для увеличения допустимого сопротивления нагрузки вторичные обмотки ТА соединяют согласно-последовательно. Соединяемые ТА должны быть однопольными. Обмотки могут быть разных классов точности, но с одинаковым коэффициентом трансформации. Когда рабочий ток установки значительно ниже номинального тока ТА, ток в нагрузке увеличивают, соединяя вторичные обмотки ТА согласно-параллельно.

11.1.3. Классификация.

Трансформаторы тока классифицируют:

- по конструкции — втулочные, встроенные, проходные, опорные, шинные, разъемные;
- роду установки — наружные, для закрытых и комплектных распределительных устройств;
- числу ступеней трансформации — одноступенчатые и каскадные;
- коэффициентам трансформации — с одним или несколькими значениями;
- числу и назначению вторичных обмоток.

Буквенные обозначения:

Т — трансформатор тока;

Ф — с фарфоровой изоляцией;

Н — наружной установки;

К — каскадный, с конденсаторной изоляцией или катушечный;

П — проходной;

О — одновитковый стержневой;

Ш — одновитковый шинный;

В — с воздушной изоляцией, встроенный или с водяным охлаждением;

Л — с литой изоляцией;

М — маслonaполненный, модернизированный или малогабаритный;

Р — для релейной защиты;

Д — для дифференциальной защиты;

З — для защиты от замыканий на землю.

11.1.4. Другие виды измерительных преобразователей тока.

В цепях постоянного тока, преимущественно в силовых, находят применение *трансформаторы постоянного тока*. Как и в цепях переменного тока, первичная обмотка включается в цепь измеряемого тока (в расщелку проводника), вторичные же обмотки подключаются к источнику синусоидального напряжения последовательно с нагрузкой. В них наводится ЭДС, значение которой зависит от первичного тока. Ток вторичной цепи пропорционален первичному току, если сопротивление нагрузки намного меньше индуктивного сопротивления обмоток.

В *трансреакторах* измерительная информация о первичном токе представляется вторичным напряжением (а не током). Сопротивление нагрузки выбирается настолько большим, что режим работы близок к холостому ходу.

Электромагнитные дистанционные (магнитные) преобразователи содержат обмотку, индуктивно связанную с контролируемым токопроводом. Индуцируемая в ней ЭДС определяется токами всех трех фаз, но преимущественно (в пределах допускаемой погрешности) одной из них.

Опτικο-электронные устройства осуществляют преобразование входного электрического сигнала на потенциале провода линии в световой, передачу последнего по оптическому каналу на потенциал земли и обратное преобразование его в электрический сигнал.

Последние два типа наиболее просты, дешевы, имеют малые габариты и массу, обеспечивают гальваническую развязку высоковольтной и измерительной цепей. Небольшая выходная мощность не препятствует применению их для полупроводниковой защиты.

Испытания этих видов измерителей тока регламентируются документами предприятий-изготовителей.

11.2. Измерение сопротивления изоляции:

а) первичных обмоток. Производится мегаомметром на напряжение 2500 В. Сопротивление изоляции должно быть не менее 1000 МОм для изоляции классов 3—35 кВ и 3000 МОм — для изоляции класса 110 кВ. При измерении выводы вторичных обмоток и цоколь ТА должны быть объединены и заземлены (рис. 20);

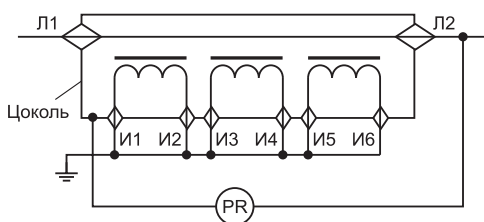


Рис. 20. Схема измерения сопротивления изоляции первичных обмоток трансформаторов тока

б) вторичных обмоток. Производится мегаомметром на напряжение 1000 В. Сопротивление изоляции вторичных обмоток вместе с подсоединенными к ним цепями должно быть не менее 1 МОм, а при отключенных вторичных цепях — не менее 50 МОм.

11.3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь изоляции

Для ТА с основной бумажно-масляной изоляцией производится при напряжении 10 кВ. Значение $\operatorname{tg} \delta$, приведенные к температуре 20 °С, не должны превышать следующих значений:

| Тип изоляции | Номинальное напряжение ТА, кВ | | |
|---------------------------|-------------------------------|-------|-----|
| | 3—15 | 20—35 | 110 |
| Бумажно-бакелитовая | 3,0 | 2,5 | 2,0 |
| Основная бумажно-масляная | — | 2,5 | 2,0 |

11.4. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции первичных обмоток. Испытание является обязательным для ТА с номинальным напряжением до 35 кВ. Значения испытательных напряжений см. в табл. 3. Продолжительность испытания ТА — 1 мин;

б) изоляции вторичных обмоток. Значение испытательного напряжения для изоляции вторичных обмоток вместе с присоединенными к ним цепями принимается равным 1 кВ, продолжительность 1 мин.

11.5. Снятие характеристик намагничивания магнитопровода трансформатора

Следует производить повышением напряжения на одной из вторичных обмоток до начала насыщения магнитопровода, но не выше 1800 В.

При наличии ответвлений обмоток характеристики следует снимать на рабочем ответвлении.

Снятые характеристики сопоставляются с типовой характеристикой намагничивания или с характеристиками намагничивания других однотипных исправных ТА.

Характеристика намагничивания представляет собой зависимость максимальных значений индукции в сердечнике ТА от действующих значений напряженности магнитного поля или, иначе говоря, зависимость ЭДС вторичной обмотки E_2 от тока намагничивания $I_{\text{нам}}$. Обычно снимают зависимость напряжения на зажимах вторичной обмотки ТА от тока в ней $U_2(I_2)$, называемую вольт-амперной характеристикой, при разомкнутой первичной обмотке. Связь между величинами E_2 и U_2 определяется выражением

$$U_2 = E_2 - I_2 z_2,$$

где z_2 — полное сопротивление вторичной обмотки.

Если сопротивление z_2 неизвестно, при расчетах можно принимать следующие значения: для ТА с кольцевым сердечником и равномерно распределенной вторичной обмоткой $z_2 = r_2$, для ТА других исполнений примерно $z_2 = 1,25r_2$, где r_2 — сопротивление обмотки постоянному току.

На практике, однако, пересчет от U_2 к E_2 производят редко, так как для большинства трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 А сопротивление $z_2 \leq 0,5$ Ом и значения U_2 и E_2 различаются незначительно. По характеристике намагничивания можно определить исправность ТА, соответствие класса сердечника его обозначению, а также возможность использования ТА в различных схемах релейной защиты (рис. 21 и 22).

На рис. 21 видно, в частности, что при сопротивлении $z_2 = 0,3$ Ом и токе намагничивания $I_{\text{нам}} = 1,1$ А падение напряжения $I_{\text{нам}} z_2 = 0,33$ В незначительно и $U_2 \approx E_2 = 65$ В. Характеристика для сердечника 3-го класса проходит значительно ниже, чем для 1-го (рис. 21); она резко снижается также при коротком замыкании витков обмотки (рис. 22), даже одного из них, что и обнаруживается при сравнении. Желательно снимать характеристику до насыщения, т. е. до точки перегиба кривой, и строить ее по 8—10 точкам. При подаче напряжения на ответвление обмотки напряжение на всей обмотке не должно превышать 1800 В.

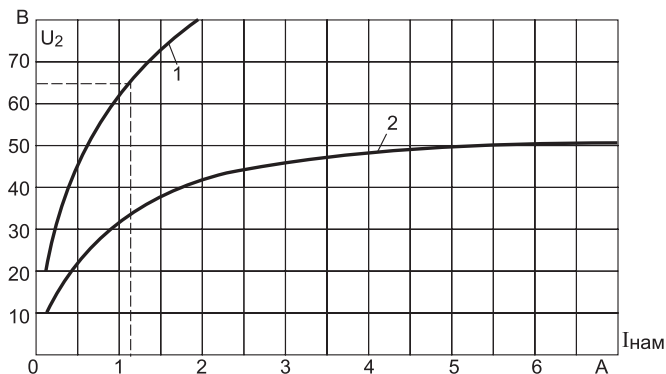


Рис. 21. Характеристики намагничивания трансформатора тока типа ТПФ-1/3,200/5; 1 — сердечник первого класса; 2 — сердечник третьего класса

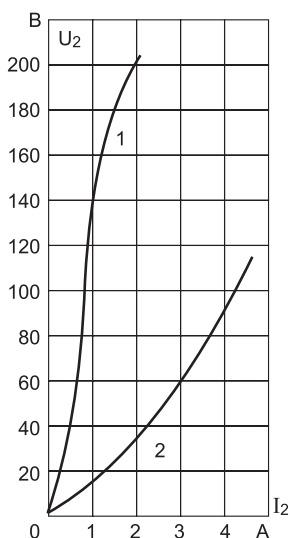


Рис. 22. Вольт-амперные характеристики ТА: 1 — исправного; 2 — с закороченными витками

Как известно, цепи со сталью нелинейны, и при синусоидальном напряжении искажается форма кривой тока, а при синусоидальном токе — форма кривой напряжения. По этой причине характеристики намагничивания, снятые приборами различных систем, отличаются друг от друга.

Принято проводить измерения приборами, реагирующими на среднее значение напряжения и действующее значение тока. Применительно к аналоговым (стрелочным) приборам это означает, что для измерения напряжения следует применять приборы выпрямительной (детекторной) системы, для измерения тока — приборы электромагнитной или электродинамической систем. Надо только помнить, что детекторные приборы (типа Ц и т. п.), реагирующие на среднее значение измеряемой величины, градуируются, тем не менее, на ее действующее (эффективное) значение при синусоидальной форме

кривой, т. е. среднее значение, умноженное на 1,11. Приборы электронной и цифровой систем должны иметь соответствующие преобразователи.

Для регулирования применяют обычно схемы с одним или двумя автотрансформаторами (типа ЛАТР), практически не искажающими кривую напряжения (рис. 23). Схема с одним ЛАТРОм обеспечивает получение регулируемого напряжения в пределах от 0 до 250 В, с двумя — до 450 В. При необходимости иметь большие значения напряжения используют промежуточный повышающий трансформатор напряжения, например типа НОМ, регулируя его так, чтобы на один виток вторичной обмотки приходилось не более 1—1,2 В во избежание повреждения межвитковой изоляции.

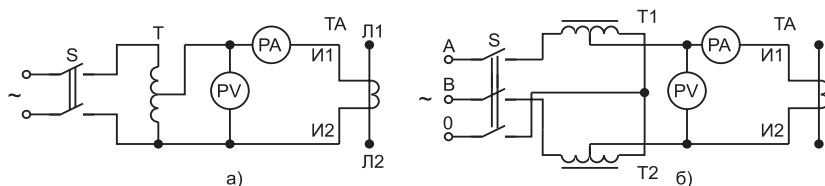


Рис. 23. Снятие характеристики намагничивания при помощи одного (а) и двух (б) автотрансформаторов

Когда повышающий трансформатор отсутствует или применение его почему-либо затруднено, можно снять характеристику при подаче тока в первичную обмотку от нагрузочного трансформатора. Снятая характеристика не должна отличаться от типовой более чем на 10 %. Если отличие составляет 10—25 %, производят дополнительную проверку ТА.

С этой целью во вторичную цепь ТА включают резистор сопротивлением $(10-30)z_2$; резкое уменьшение вторичного тока будет свидетельствовать о наличии виткового замыкания. Разница в 40—50 % требует безусловной замены трансформатора.

У маломощных ТА невысокого класса точности ток намагничивания достигает нескольких ампер; в этом случае потребление вольтметра особого значения не имеет. У мощных ТА высокого класса точности с большим объемом стали сердечника и особенно с вторичным током 1 А ток намагничивания составляет всего десятки или сотни миллиампер; в этом случае вольтметр должен иметь достаточно высокое внутреннее сопротивление и подключаться непосредственно к обмотке ТА. Некоторые фирмы вместо кривой намагничивания приводят значения тока и напряжения только в одной ее точке, называемой *контрольной*. Чтобы получить представление о возможном диапазоне этих значений, в табл. 25 приведены данные для некоторых типов ТА.

У литых трансформаторов типа ТОЛ-10 измерение тока намагничивания производят при следующих значениях напряжения (если иное не оговорено в фирменных документах): 35 В при номинальном токе ТА от 5 до 300 А; 37, 40, 42 и 49 В при токах соответственно 400—600, 800, 1000 и 1500 А. Значение тока намагничивания для всех этих ТА должно быть не более 4 А; фактически оно бывает гораздо меньше.

Таблица 25. Контрольные точки вольт-амперной характеристики встроенных (ТВТ) и выносных (ТФЗМ) трансформаторов тока

| Тип трансформатора | Напряжение, В (среднее значение) | Ток намагничивания, мА, не более |
|--------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| ТВТ10-1-5000/5 | 126 | 32 |
| ТВТ10-1-12000/5 | 800 | 18 |
| ТВТ35-1-300/5 | 50 | 10900 |
| ТВТ35-1-3000/1 | 1113 | 11 |
| ТВТ110-1-300/5 | 126 | 2240 |
| ТВТ110-1-1000/1 | 1035 | 38 |
| ТФЗМ-35А-15-600/5 | 183 | 1953 |
| ТФЗМ-35Б-П-3000/1 | 1054 | 206 |
| ТФЗМ-110Б-50-600/5 | 156 | 2267 |

11.6. Проверка полярности выводов ТА

Производится при монтаже, если отсутствуют паспортные данные или возникают сомнения в их достоверности. Полярность обмоток ТА должна соответствовать паспортным данным.

Однополярными у ТА являются выводы Л1 и И1 («начало»), Л2 и И2 («конец»): это означает, что при направлении тока в первичной обмотке от Л1 к Л2 вторичный ток проходит по внешней цепи от И1 к И2. Методика проверки аналогична описанной выше (п. 10.5) и иллюстрируется рис. 24 и 25; дополнительный резистор R введен здесь для ограничения тока в первичной цепи. Если чувствительность прибора GB окажется слишком высока, ее можно уменьшить, зашунтировав прибор отрезком провода. Следует иметь в виду, что при размыкании рубильника S на зажимах вторичных обмоток мощных ТА, особенно на номинальный ток 1 А, может возникнуть ЭДС, достигающая опасных значений.

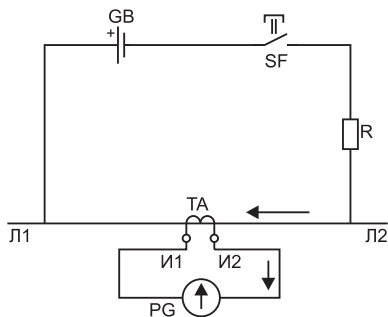


Рис. 24. Принципиальная схема проверки полярности ТА

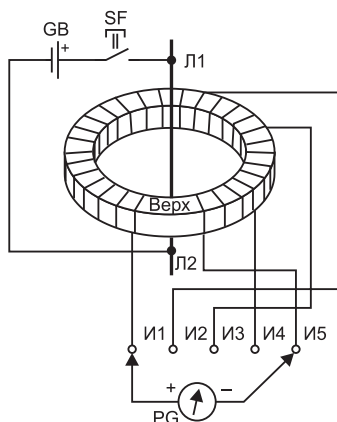


Рис. 25. Схема проверки полярности встроенного ТА

Для определения выводов Л1 («верх») и Л2 («низ») встроенного ТА через окно его продевается провод, используемый в качестве первичной обмотки. Источник тока GB подключается к нему зажимом «+» со стороны «верха» ТА, прибор РГ зажимом «+» к выводу И1, зажимом «-» к рабочему ответвлению; при замыкании рубильника S стрелка прибора РГ должна отклониться вправо. При установке ТА на выключатель «верх» определяют по расположению заводской таблицы параметров. По окончании монтажа проверяют правильность установки ТА и монтажа токовых цепей от выводов вторичной обмотки до клеммной сборки. Для этого «плюс» батареи подключается поочередно к выводам выключателя снаружи, а «минус» — к контакту соответствующего ввода внутри бака; прибор подключается к выводам вторичных обмоток на клеммной сборке. При проверке ТА, установленных во вводы силовых трансформаторов, первичной обмоткой может служить токоведущий стержень, который опускают в окно ТА до упора в дно корпуса; «плюс» подключают к стержню, «минус» — к корпусу ТА.

11.7. Измерение коэффициента трансформации

Отклонение измеренного значения коэффициента от паспортного или от известного для однотипного исправного трансформатора не должно превышать 2%. Проверку производят с помощью нагрузочного устройства (рис. 26), по возможности совмещая ее для экономии времени с прогрузкой токовых защит.

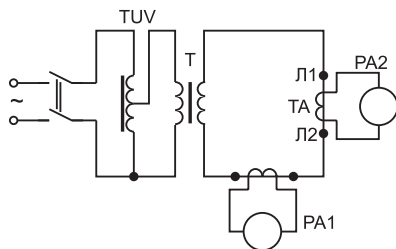


Рис. 26. Схема измерения коэффициента трансформации ТА: TUV — автотрансформатор; T — нагрузочный трансформатор; PA1, PA2 — амперметры

Значение первичного тока принимают обычно в пределах $(0,1-0,25)I_n$.

В качестве регулировочного автотрансформатора применяют ЛАТР. Нагрузочный трансформатор — понижающий (по напряжению), с большим коэффициентом трансформации, работает практически в режиме короткого замыкания. Номинальная мощность до $1 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ в большинстве случаев бывает достаточной. При первичном токе ТА до нескольких сот ампер можно использовать широко распространенный «котельный» трансформатор с номинальным вторичным напряжением 12 В.

Если ТА имеет несколько вторичных обмоток, то все они во время измерения должны быть замкнуты.

Коэффициент трансформации ТА с первичной обмоткой на магнитопроводе может быть измерен и методом напряжений. Для этого на вторичную обмотку подают регулируемое напряжение U_1 и измеряют напряжение на пер-

вичной обмотке U_2 , а коэффициент трансформации определяют как отношение U_1/U_2 ; обычно $U_1 \leq 220$ В.

При проверке ответвлений вторичной обмотки напряжение подается на любые два вывода, измеряется напряжение между другими парами выводов и определяется та из них, где значение напряжения максимальное: это — конечные выводы обмотки (И1—И5), соответствующие наибольшему коэффициенту трансформации. Затем на эти выводы подают напряжение, значение которого удобно выбрать равным числу витков обмотки (если оно известно), и измеряют напряжение между конечными выводами и всеми другими выводами обмотки; наименьшее напряжение соответствует ответвлению с наименьшим коэффициентом трансформации. Зная номинальный коэффициент трансформации (из паспорта), можно определить коэффициент трансформации на каждом ответвлении. Нужно учитывать, что в целях компенсации токовой погрешности ТА реальное число витков вторичной обмотки может быть уменьшено по сравнению с числом витков, рассчитанным по номинальному коэффициенту трансформации. В качестве примера на рис. 27 приведены обмоточные данные, а в табл. 26 — результаты измерения напряжения на разных ответвлениях ТА при подаче на зажимы И1—И5 напряжения, равного числу витков всей обмотки.

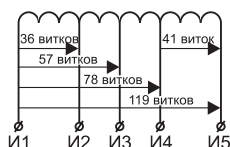


Рис. 27. Обмоточные данные встроенного ТА с коэффициентом трансформации 600/5

Таблица 26. Измерение напряжения на ответвлениях И1—И5 обмотки встроенного трансформатора тока (пример)

| Зажимы | Показания вольтметра, В | Коэффициент трансформации |
|--------|-------------------------|---------------------------|
| И1—И2 | 36 | 200/5 |
| И1—И3 | 57 | 300/5 |
| И1—И4 | 78 | 400/5 |
| И1—И5 | 120 | 600/5 |
| И4—И5 | 42 | — |

11.8. Измерение сопротивления вторичных обмоток постоянному току

Производится у трансформаторов тока на напряжение 110 кВ и выше. Отклонение измеренного значения сопротивления обмотки от паспортного или сопротивления обмоток других фаз не должно превышать 2 % при одной и той же температуре.

Используются приборы класса 0,5; при сопротивлении до 1 Ом применяется схема двойного моста.

12. Изоляторы

12.1. Краткие сведения

Конструктивно и по назначению изоляторы подразделяются на штыревые, подвесные, опорные и проходные. Штыревые изоляторы состоят из одного или двух фарфоровых элементов и армируются на металлических штырях, закрепляемых в траверсах опор. Все штыревые изоляторы обеспечивают жесткое крепление проводов на опорах.

Линейные подвесные изоляторы обеспечивают нежесткую связь проводов с опорами ЛЭП. Тарельчатые подвесные изоляторы соединяются в гирлянды. Кроме тарельчатых, находят применение стержневые линейные изоляторы, позволяющие повысить электрическую прочность благодаря тому, что они не подвержены пробою.

Опорные изоляторы служат для поддержания шин и контактных деталей РУ и электрических аппаратов.

Опорно-штыревые изоляторы состоят из одного, двух или трех фарфоровых элементов, жестко соединенных друг с другом и закрепленных на чугунном штыре. Применяются в качестве изоляционных опор в ОРУ, в связи с чем имеют выступающие крылья для защиты от атмосферных осадков. Опорно-стержневые изоляторы тоже предназначены для работы в наружных установках. Такой изолятор представляет собой сплошной фарфоровый стержень с выступающими крыльями, на торцевых частях которого закреплены чугунные колпаки для соединения изоляторов в колонки и для крепления их на аппаратах и в РУ.

Проходные изоляторы применяются для вывода проводников ВН из баков трансформаторов, масляных и воздушных выключателей, а также для изоляции проводов, проходящих через стены зданий. Они состоят из фарфорового элемента, через внутреннюю полость которого пропущен токоведущий металлический стержень или группа шин. Разновидностью проходных изоляторов являются вводы. Токоведущей частью ввода служит медная труба; основная внутренняя изоляция — керамическая, жидкая или бумажно-масляная, из бакелита или других твердых органических материалов.

12.2. Вводы и проходные изоляторы

Измерение сопротивления изоляции. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. См. п. 3.3.

12.3. Подвесные и опорные изоляторы

Для опорно-стержневых изоляторов испытание повышенным напряжением не обязательно.

Электрические испытания стеклянных подвесных изоляторов не производятся. Контроль их состояния осуществляется путем внешнего осмотра.

12.3.1. Измерение сопротивления изоляции подвесных и многоэлементных изоляторов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ только при положительных температурах окружающего воздуха. Проверку изоляторов следует производить непосредственно перед их установкой в РУ и на линиях электропередачи. Сопротивление изоляции каждого подвесного изолятора или каждого элемента штыревого изолятора должно быть не менее 300 МОм.

12.3.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) опорных одноэлементных изоляторов. Значения испытательного напряжения приведены в табл. 27; продолжительность приложения его — 1 мин;

б) опорных многоэлементных и подвесных изоляторов. Вновь устанавливаемые штыревые и подвесные изоляторы следует испытывать напряжением 50 кВ, прикладываемым к каждому элементу изолятора в течение 1 мин. Допускается не производить испытание подвесных изоляторов.

Таблица 27. Испытательное напряжение опорных одноэлементных изоляторов

| Испытуемые изоляторы | Испытательное напряжение для номинального напряжения электроустановки, кВ | | | | | |
|---|--|----|----|----|----|-----|
| | 3 | 6 | 10 | 15 | 20 | 35 |
| Изоляторы, испытываемые отдельно | 25 | 32 | 42 | 57 | 68 | 100 |
| Изоляторы, установленные в цепях шин и аппаратов | 24 | 32 | 42 | 55 | 65 | 95 |

13. Шины и токопроводы

13.1. Сборные и соединительные шины

Шины испытываются в объеме:

на напряжение до 1 кВ — по п. 13.1.1, 13.1.3—13.1.5;

на напряжение выше 1 кВ — по п. 13.1.2—13.1.6.

13.1.1. Измерение сопротивления изоляции подвесных и опорных фарфоровых изоляторов. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ при положительной температуре окружающего воздуха. Сопротивление каждого изолятора или каждого элемента многоэлементного изолятора должно быть не менее 300 МОм.

13.1.2. Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты.

Испытание производится согласно табл. 28, продолжительность — 1 мин.

Таблица 28. Испытательное напряжение промышленной частоты для изоляции токопровода

| Класс напряжения, кВ | Класс напряжения, кВ | |
|----------------------|----------------------|---|
| | фарфоровой | смешанной (керамической и из твердых органических материалов) |
| 6 | 32 | 28,8 |
| 10 | 42 | 37,8 |
| 15 | 55 | 49,5 |
| 35 | 95 | 85,5 |

13.1.3. Проверка качества выполнения болтовых контактных соединений. Измеряется переходное сопротивление контактных соединений выборочно у 2—3 % соединений. Контактные соединения на ток более 1000 А рекомендуются проверять в полном объеме.

Падение напряжения или сопротивление на участке шины (0,7—0,8 м) в месте контактного соединения не должно превышать падения напряжения или сопротивления участка шин той же длины и того же сечения более чем в 1,2 раза.

13.1.4. Проверка качества выполнения опрессованных контактных соединений.

Следует произвести выборочное измерение переходного сопротивления 3—5 % опрессованных контактных соединений. Падение напряжения или сопротивление на участке соединения не должно превышать падения напряжения или сопротивления на участке провода той же длины более чем в 1,2 раза.

13.1.5. Контроль сварных контактных соединений. Состояние сварных контактных соединений определяется визуально.

13.1.6. Испытание проходных изоляторов. Производится в соответствии с п. 12.2.

13.2. Комплектные токопроводы (шинопроводы)

13.2.1. Определения.

Токопроводом называется устройство, предназначенное для передачи и распределения электроэнергии, состоящее из изолированных или неизолированных проводников и относящегося к ним оборудования. В зависимости от вида проводников токопроводы подразделяются на гибкие (при использовании проводов) и жесткие (при использовании жестких шин).

Жесткий токопровод заводского изготовления на напряжение до 1 кВ, поставляемый комплектными секциями, называется *шинопроводом*.

13.2.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты. Испытание производится при отсоединенных от токопровода вентилях разрядниках и ограничителях перенапряжений, выключателях, обмотках генератора, силовых трансформаторов и трансформаторов напряжения. Значение испытательного напряжения устанавливается согласно табл. 28. Длительность приложения нормированного испытательного напряжения к токопроводу — 1 мин.

При пробое или перекрытии изоляции должно быть обеспечено автоматическое отключение питания испытательной установки без выдержки времени.

Класс точности измерительных приборов — не ниже 1,0.

Мощность испытательного трансформатора может быть подсчитана по формуле п. 2.4. Удельная емкость комплектных токопроводов значительна и зависит от их типа и номинального тока. В частности, для токопроводов генераторного напряжения — от 40 пФ/м при номинальном токе 1600 А до 100 пФ/м при 3000 А. Во всяком случае, для испытания токопроводов РУ 6—10 кВ при номинальном токе до 3150 А и длине до 100 м и сборных шин мощность трансформатора $5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ можно считать достаточной.

Место подключения испытательной установки к токопроводу выбирается исходя из удобства сборки схемы. Если изоляционные расстояния в местах подсоединения токопровода к генераторам и трансформаторам малы, между выводами последних и шиной токопровода устанавливают изоляционные прокладки. Скорость подъема напряжения может быть произвольной, но допускающей контроль за его изменением по вольтметру.

У токопроводов с общей для трех фаз оболочкой напряжение подается на одну из фаз, две другие заземляются. На токопроводах с пофазным экранированием допускается испытание трех фаз одновременно, если это позволяет мощность испытательной установки. Сборные шины и ошиновки всегда испытываются пофазно.

Наиболее трудоемкой операцией является обнаружение дефектных изоляторов. Целесообразно выполнить ее путем разряда предварительно заряженного конденсатора через искровой разрядник на изоляцию токопровода. Ем-

кость конденсатора (батареи конденсаторов) должна составлять не менее 5 мкФ; пробивное напряжение разрядника устанавливается, как правило, на 5 кВ ниже напряжения заряда конденсаторов (до 30 кВ).

Измерение сопротивления изоляции токопроводов всех типоразмеров и ошинок производится мегаомметрами на 2500 В, для каждой фазы при заземленных двух других. При резком (в 2—3 раза) отличии сопротивлений изоляции различных фаз следует выявить причины ухудшения изоляции и устранить их.

13.2.3. Проверка качества выполнения болтовых и сварных соединений. Производится персоналом электромонтажной организации.

13.2.4. Проверка состояния изоляционных прокладок. Производится у токопроводов, оболочки которых изолированы от опорных металлоконструкций.

Станины (опоры) токопровода изолируются от несущих конструкций с помощью изоляционных прокладок, перемежающихся металлическими. У токопроводов серии КЭТ оболочка разделена на ряд изолированных друг от друга секций, каждая из которых заземлена в одной точке.

Проверка целостности изоляционных прокладок осуществляется путем сравнительных измерений падения напряжения на изоляционных прокладках секции фазы или измерения тока, проходящего в металлоконструкциях между станинами секций.

Сопротивление изоляции прокладки, а также экрана или короба, измеренное мегаомметром на 500 В, должно быть не менее 0,1 МОм. Для измерения один из зажимов прибора подсоединяется к металлической пластине, расположенной между двумя изоляционными прокладками, а второй — к металлической балке или к станине экрана.

14. Силловые кабельные и воздушные линии электропередачи

14.1. Силловые кабельные линии (КЛ)

14.1.1. Проверка целостности и фазировки жил кабеля. Проверяются целостность и совпадение обозначений фаз подключаемых жил кабеля.

Целостность жил кабелей напряжением до 20 кВ проверяется мегаомметром, а кабелей напряжением 35 кВ и выше — путем измерения сопротивления жил кабеля постоянному току. Удельное значение этого сопротивления (на 1 кв. мм сечения, 1 м длины, при температуре 20 °С) должно быть не более 0,018 для медной и 0,029 Ом для алюминиевой жил. Рекомендуются выполнять измерения по четырехзачимной схеме, сопротивление соединительных проводов — не более 0,005 Ом.

Измеренное значение сопротивления пересчитывают к температуре 20 °С по формуле

$$R = \frac{R_t}{1 + 0,004(T - 20)},$$

где R — определяемое сопротивление при 20 °С, Ом; R_t — сопротивление, измеренное при температуре T , Ом; 0,004 1/°С — температурный коэффициент сопротивления; T — температура жил кабеля при измерении, °С; принимается равной температуре окружающей среды после выдержки в отключенном состоянии не менее 10 сут при прокладке кабеля в земле и не менее 4 ч — на воздухе.

14.1.2. Измерение сопротивления изоляции. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Для силовых кабелей до 1 кВ сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм. Для силовых кабелей выше 1 кВ сопротивление изоляции не нормируется. Измерение следует производить до и после испытания кабеля повышенным напряжением, для каждой жилы относительно оболочки и других заземленных жил.

Для одножильных кабелей без металлического экрана (брони, оболочки), проложенных в земле, измерения производятся между жилой и землей. Для одножильных кабелей с металлическим экраном (оболочкой, броней) измерение производится между жилой и экраном.

Перед измерениями КЛ должна быть разряжена путем соединения металлических элементов между собой и с землей не менее чем на 2 мин. Отсчет значений сопротивления изоляции производят через 1 мин после приложения напряжения. Причиной асимметрии могут быть увлажнение и загрязнение концевых муфт КЛ, которые устраняются при пропитке.

14.1.3. Силовые кабели выше 1 кВ испытываются повышенным напряжением выпрямленного тока. Значения испытательного напряжения и длительность его приложения приведены в табл. 29. В процессе испытания обращается внимание на характер изменения тока утечки. Кабель считается выдержавшим испытания, если не было пробоя, скользящих разрядов и толчков тока утечки или его нарастания после того, как он достиг установившегося значения.

Таблица 29. Испытательное напряжение выпрямленного тока для силовых кабелей

| Изоляция и марка кабеля | Испытательное напряжение (кВ) для кабелей на рабочее напряжение, кВ | | | | Продолжительность испытаний, мин |
|-------------------------|---|----|----|----|----------------------------------|
| | 2 | 3 | 6 | 10 | |
| Бумажная | 12 | 18 | 36 | 60 | 10 |
| Резиновая | — | 6 | 12 | 20 | 5 |
| Пластмассовая | — | 15 | 36 | 60 | 10 |

Испытание выпрямленным напряжением одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией без брони (экранов), проложенных на воздухе, не производится.

Применение выпрямленного напряжения в качестве испытательного обьясняется стремлением уменьшить мощность повышающего трансформатора: при переменном напряжении ток его нагрузки определялся бы преимущественно емкостью кабеля, которая сравнительно велика (табл. 30). Значения емкости трехжильных кабелей с отдельно изолированными и опрессованными свинцом или алюминием жилами с бумажной обедненно-пропитанной изоляцией несколько больше (примерно на 25 %), а с нормальной изоляцией в 2,3—2,5 раза больше, чем соответствующие значения по табл. 30.

Тем не менее допускается испытание напряжением переменного тока кабельных линий напряжением 110 кВ и выше. Испытание производится напряжением $(1,00—1,73)U_{ном}$, длительность — согласно указаниям завода-изготовителя.

Таблица 30. Ориентировочные значения емкости одной жилы на оболочку трехжильных кабелей с поясной изоляцией и секторными жилами, мкФ/км

| Сечение жил, кв. мм | 10 | 16 | 25 | 35 | 50 | 70 | 95 | 120 | 150 | 185 | 240 |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Емкость | $\frac{0,10}{0,08}$ | $\frac{0,11}{0,09}$ | $\frac{0,14}{0,11}$ | $\frac{0,16}{0,12}$ | $\frac{0,18}{0,14}$ | $\frac{0,21}{0,17}$ | $\frac{0,25}{0,19}$ | $\frac{0,28}{0,22}$ | $\frac{0,31}{0,24}$ | $\frac{0,34}{0,26}$ | $\frac{0,38}{0,29}$ |

Примечание. В числителе приведены значения емкостей для кабелей на 6 кВ, в знаменателе — на 10 кВ.

К примеру, для кабеля на 10 кВ с сечением жил 50 кв. мм удельная емкость составляет 0,14 мкФ/км. Пусть длина кабеля 1 км, требуемое напряжение $U_{исп} = 42$ кВ (амплитуда 60 кВ); тогда по формуле п. 4.2 мощность трансформатора должна быть:

$$P = 314 \times 0,14 \times 42 \times 10 = 77 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

При испытании этого же кабеля постоянным током при напряжении $U_{\text{исп}} = 60$ кВ (табл. 29) и с учетом того, что сквозной ток утечки $I_{\text{ут}}$ неповрежденной изоляции обычно не превышает 1 мА, получим:

$$P = U_{\text{исп}} \times I_{\text{ут}} = 60 \times 1 = 60 \text{ Вт.}$$

Хотя по ряду причин (намагничивание сердечника постоянной составляющей, наличие переменной составляющей тока и др.) расчетная мощность трансформатора выбирается значительно большей, она обычно не превышает нескольких киловатт.

Выпрямление чаще всего осуществляется по однополупериодной схеме ввиду ее простоты. При включении такой схемы на активную нагрузку выпрямленное напряжение и ток нагрузки будут представлять собой положительные полусинусоиды (рис. 28а); в отрицательные полупериоды ток отсутствует. При этом среднее значение выходного напряжения

$$U_{\text{ср}} = \frac{U_m}{\pi} = 0,45U,$$

где U_m — амплитуда вторичного напряжения испытательного трансформатора; U — его действующее значение.

Однако практически в цепи нагрузки всегда имеется емкость (самого объекта, подводящих проводов и пр.), которая в положительный полупериод заряжается, а в отрицательный разряжается по закону экспоненты, поддерживая напряжение и ток нагрузки и повышая их среднее значение (рис. 28б).

Когда же нагрузка содержит большую емкость (например, кабель большой длины), напряжение «сглаживается» и приближается по форме к постоянно-

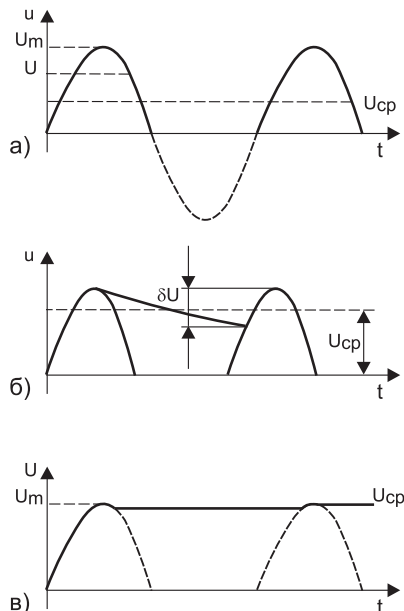


Рис. 28. Форма кривой выпрямленного напряжения при нагрузке: а — активной; б, в — с емкостью

му, а его среднее значение — к амплитудному: $U_{\text{cp}} = U_m$ (рис. 28в). Это напряжение можно измерять вольтметром постоянного тока.

Абсолютное значение пульсации напряжения δU (рис. 28б) можно определить по приближенной формуле:

$$\delta U \approx \frac{I_{\text{ут}}}{Cf},$$

где f — частота питающей сети переменного тока.

Соответственно относительное значение этой величины, называемое коэффициентом пульсации, будет:

$$K = \frac{100U}{U_m} \% = \frac{100}{RCf} \%,$$

где $R = U_m/I_{\text{ут}}$ — эквивалентное активное сопротивление цепи нагрузки, в основном — сопротивление изоляции кабеля.

Погрешность расчетов по данным формулам, а также коэффициент пульсации тем меньше, чем больше сопротивление изоляции и емкость кабеля, или постоянная времени цепи разряда емкости $T = R \times C$. При численных значениях этих параметров $R = 60 \cdot 10^3 / 1 \cdot 10^{-3} = 60 \cdot 10^6$ Ом, $C = 0,14 \cdot 10$ Ф ($T = 8,4$ с), как в приведенном выше примере, и частоте $f = 50$ Гц получим $K = 0,24$ % — практически полное сглаживание.

Испытания производятся в порядке, указанном в п. 14.1.2. Металлические экраны (оболочки, броня) должны быть заземлены. Пластмассовые оболочки (шланги) кабелей, проложенных в земле, испытываются между отсоединенными от земли экранами (оболочками) и землей, а проложенных на воздухе — не испытываются.

Контроль испытательного напряжения чаще всего производится с помощью вольтметра, включенного на низшей стороне испытательного трансформатора. Шкала вольтметра градуируется в киловольтах амплитудного значения напряжения, для чего фиксируемые им действующие значения переменного напряжения умножаются на коэффициент трансформации и на $\sqrt{2}$ (для перехода к амплитудным значениям). Достаточная точность такого способа измерения обеспечивается при условии, что напряжение питающей сети синусоидально, а пульсация выпрямленного напряжения незначительна. Обычно принимают, что пульсация должна быть не более 3—5 %, инструментальная погрешность измерения напряжения — до 3 %.

Принципиальная электрическая схема испытательной установки с однополупериодным выпрямлением показана на рис. 29.

Подъем напряжения до (25—30) % $U_{\text{исп}}$ можно производить с любой скоростью, ограничиваемой только бросками зарядного тока в кабеле.

Напряжение поднимают плавно со скоростью 1—2 кВ/с и поддерживают неизменным в продолжение всего периода испытания. Отсчет времени следует производить с момента установления нормированного значения напряжения, а отсчет тока утечки по микроамперметру — в конце испытания. По истечении нормированного времени напряжение плавно снижают до 30 % $U_{\text{исп}}$, затем испытательная установка может быть отключена от сети толчком.

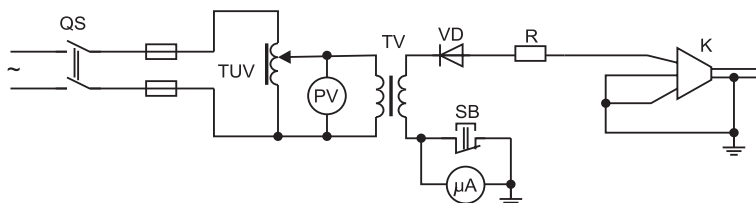


Рис. 29. Принципиальная электрическая схема испытания изоляции кабеля выпрямленным напряжением: QS — рубильник; TUV — автотрансформатор (ЛАТР); TV — испытательный трансформатор; VD — выпрямитель; R — токоограничивающий резистор; А — микроамперметр; SB — кнопка включения микроамперметра; К — испытуемый кабель

После отключения заряд и напряжение на кабеле будут медленно уменьшаться по закону экспоненты с постоянной времени T , так что для снижения напряжения до $1\% U_{исп}$, например, потребуется время $t = 4,5T$, а до $0,1\% U_{исп}$ — время $t = 7T$. При реальных значениях сопротивления изоляции и емкости кабеля постоянная времени может достигать десятков минут, а значит, опасное напряжение может сохраняться на кабеле несколько часов. Поэтому после снятия испытательного напряжения кабель следует разрядить путем замыкания испытанной жилы на землю сначала через резистор (сопротивлением $10\text{--}50\text{ кОм}$), а потом накоротко и наложить заземление.

Контрольный разряд кабеля производят также и перед началом работ, так как заряд может наводиться на нем и при испытании соседних кабелей.

Во время испытания ведется наблюдение за показаниями приборов и разделками на концах кабеля. При удовлетворительном состоянии кабеля ток утечки при подъеме напряжения сначала резко возрастает (за счет заряда емкости кабеля), затем быстро спадает. При наличии дефектов ток утечки спадает медленно и может даже возрастать, особенно при полном испытательном напряжении. В этих случаях испытание производят до выявления дефекта, но не более 15 мин. Допустимое значение тока утечки кабелей напряжением $6\text{--}10\text{ кВ}$ принимается равным соответственно $200\text{--}500\text{ мкА}$.

Обращается внимание на асимметрию (разницу одновременно наблюдаемых значений) токов утечки по фазам. Для кабелей $6\text{--}10\text{ кВ}$ разница между наибольшим и наименьшим значениями более чем в 8 раз является признаком дефекта, обычно плохой разделки муфт. В таких случаях испытание продолжают до наступления пробоя. При удовлетворительном состоянии изоляции это отношение не превышает 2.

14.1.4. Определение активного сопротивления жил. Производится для линий 20 кВ и выше. Сопротивление жил кабеля постоянному току, приведенное к 1 кв. мм сечения, 1 м длины и температуре $+20\text{ °C}$, должно быть не более $0,0179\text{ Ом}$ для медной жилы и не более $0,0294\text{ Ом}$ для алюминиевой. Результат измерения, приведенный к удельному значению и температуре 20 °C , не должен отличаться от указанных значений более чем на 5% .

Измерение производится с помощью моста постоянного тока или цифровых приборов достаточной чувствительности (с пределом 10 Ом). Температура

окружающей среды должна измеряться на высоте расположения кабеля, на расстоянии не более 1 м от него.

При измерении сопротивления жил 1, 2 и 3 трехжильного кабеля они попарно (1—2, 2—3, 3—1) присоединяются к измерительному прибору на одном конце кабеля, а на другом конце соединяются болтом наглухо. Сопротивления фаз рассчитываются по следующим формулам:

$$r_1 = \frac{r_{12} + r_{13} - r_{23}}{2}; \quad r_2 = \frac{r_{12} + r_{23} - r_{13}}{2}; \quad r_3 = \frac{r_{13} + r_{23} - r_{12}}{2}.$$

Активное сопротивление на переменном токе при частоте 50 Гц несколько выше сопротивления постоянному току (омического) за счет влияния поверхностного эффекта и эффекта близости. Это влияние учитывается поправочным коэффициентом, значение которого зависит от конструкции кабеля и сечения токопроводящей жилы (табл. 31). Для жил сечением до 120 мм включительно поправочный коэффициент не вводится.

Таблица 31. Значения поправочного коэффициента для пересчета омического сопротивления жил кабеля на активное сопротивление переменному току частотой 50 Гц

| Конструкция кабеля | Номинальное сечение жилы, кв. мм | | | | |
|--|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 150 | 185 | 240 | 300 | 400 |
| Трехжильные кабели с поясной изоляцией | 1,01 | 1,02 | 1,035 | 1,052 | 1,095 |
| Одножильные кабели или кабели с отдельно освинцованными жилами | 1,006 | 1,008 | 1,011 | 1,025 | 1,050 |

14.1.5. Определение электрической рабочей емкости жил. Производится для линий 20 кВ и выше. Измеренная емкость не должна отличаться от результатов заводских испытаний более чем на 5 %.

Рабочая емкость трехжильного кабеля может быть выражена через частичные емкости:

$$C_p = C_0 + 3C_1, \text{ мкФ/км,}$$

где C_0 — частичная емкость жилы на оболочку; $C_1 = C_{12} = C_{13} = C_{23}$ — частичная емкость между двумя жилами.

Рабочая емкость C_p характеризует нормальную работу линии и служит для подсчета зарядного тока по формуле (при симметричном трехфазном напряжении):

$$I_c = U_\phi C_p \omega 10^{-3}, \text{ А/км.}$$

Емкость жилы относительно оболочки характеризует работу трехфазной линии при замыкании на землю. Ее значение может служить для подсчета потребной мощности при испытании кабеля повышенным напряжением переменного тока (по п. 14.1.3) или емкостного тока замыкания на землю по формуле:

$$3\omega U_\phi C_0 10^{-6}, \text{ А/км,}$$

где U_ϕ — фазное напряжение линии, кВ; $\omega = 314$ 1/с — угловая частота.

Рабочая емкость трехжильного кабеля с поясной изоляцией непосредственно измерена быть не может. Для ее определения необходимо измерить по крайней мере две из трех следующих величин:

$C_I = C_0 + 2C_1$ — емкость жилы по отношению к двум другим и металлической оболочке;

$C_{II} = 2C_0 + 2C_1$ — емкость двух жил по отношению к третьей жиле и металлической оболочке;

$C_{III} = 3C_0$ — емкость трех жил относительно металлической оболочки.

Получив эти данные, можно рассчитать значение рабочей емкости по одному из трех следующих выражений:

$$C_p = 1,5C_I - 0,5C_0; \quad C_p = \frac{3}{2}C_{II} - \frac{2}{3}C_{III}; \quad C_p = \frac{3}{2}C_{II} - \frac{1}{6}C_{III}.$$

14.1.6. Измерение распределения тока по одножильным кабелям. Неравномерность в распределении токов на кабелях не должна быть более 10 %.

Проверяется токораспределение по кабельным линиям при параллельном включении нескольких (обычно от 2 до 6) одножильных кабелей, которое часто применяется, например, на станциях и подстанциях для соединения сборных шин ЗРУ с мощными однофазными трансформаторами, установленными на открытом воздухе. На таких КЛ должны быть измерены токи, протекающие как в жилах, так и в металлических оболочках и броне.

Однофазные кабели должны прокладываться так, чтобы в общем магнитном поле они занимали симметричное положение. При нарушении этого требования индуктивное сопротивление кабелей будет различным и нагрузки на параллельно соединенных кабелях распределятся неравномерно, что может привести к перегреву отдельных кабелей. Кроме того, на нагрев кабеля влияют и токи, наводимые в оболочке и броне, которые в зависимости от материала последних и положения кабеля в пространстве могут достигать 100 % тока жилы.

Неравномерность в распределении тока устраняется изменением раскладки кабелей, пересоединением концов кабелей или путем искусственного увеличения индуктивного сопротивления перегруженных кабелей. При наличии прямых и обратных кабелей (когда, например, соединение обмоток трансформаторов выполнено в ЗРУ) выравнивание производится для одного и другого направлений в отдельности.

Измерение обычно выполняют клещами на вертикальных участках кабеля, около концевых муфт: ниже концевых разделок измеряют общий ток, протекающий в жиле и оболочке, броне, а выше концевой разделки — ток, протекающий только в жиле кабеля. Ток, протекающий по оболочке, броне, находят как разность первого и второго значений.

Правильность измерений контролируют суммированием токов в отдельных параллельно соединенных кабелях. Измерения токов и температур желательно проводить при нагрузках, близких к номинальным, по возможности быстрее, поскольку нагрузка с течением времени может изменяться.

14.1.7. Проверка антикоррозионных защит.

Металлические оболочки и стальные трубопроводы кабелей должны быть защищены от почвенной коррозии и действия блуждающих токов. Электроза-

щита от коррозии осуществляется посредством катодной поляризации, под которой понимается искусственное придание оболочке отрицательного потенциала относительно земли.

Основным источником блуждающих токов являются системы электропитания трамвайного и электрифицированного железнодорожного транспорта и метрополитена, в которых «минус» источника питания соединен с рельсовыми путями. Часть тока, ответвляющаяся в землю, вызывает разрушение металлических оболочек кабелей из-за электролитической коррозии, причем оболочка играет роль анода. Наиболее интенсивному разрушению подвержена свинцовая оболочка кабеля; интенсивность разъедания у стали в 3 раза, у алюминия — в 11 раз меньше, чем у свинца.

Максимальные значения блуждающих токов наблюдаются в часы наиболее интенсивного движения рельсового транспорта. Для уменьшения этих токов принимают меры к снижению продольного сопротивления рельсов и повышению переходного сопротивления рельсы—земля, уменьшают протяженность рельсового пути, относящегося к одному отсасывающему пункту. Вблизи отсасывающего пункта потенциалы рельсового пути всегда отрицательны (катодная зона рельсов). С перемещением электротранспорта образуются знакопеременные зоны, а при большом количестве электроподвижного состава на линии отдельные участки рельсов могут иметь всегда только положительный потенциал (анодная зона рельсов).

Практика показывает, что даже весьма незначительные положительные потенциалы на свинцовых оболочках кабелей (0,1—0,2 В) могут вызвать их интенсивное разрушение. Большие отрицательные потенциалы в известных условиях также являются опасными. Поэтому стремятся уменьшить перепады потенциалов вдоль пути электрифицированного транспорта и разности потенциалов между рельсами. Для снижения перепада потенциала в рельсах служат отсасывающие устройства, соединяющие изолированными одножильными кабелями различные точки рельсов с «минусом» тяговой подстанции.

Падения напряжения на различных участках пути в зоне одной подстанции должны быть примерно одинаковыми (2—3 В), а перепады потенциалов на стыках — не более 0,05—0,10 В. Территориально наиболее опасными являются места расположения подстанций и отсасывающих пунктов. Разность потенциалов между отсасывающими пунктами не должна превышать 1 В.

Работа антикоррозионных защит для кабелей и трубопроводов проверяется в случаях, оговоренных в ПУЭ. При проверке измеряются потенциалы и токи в оболочках кабелей и параметры электрозащиты (ток и напряжение катодной станции, ток дренажа).

Разность потенциалов и плотность тока.

Измерение потенциалов оболочки кабеля по отношению к земле и стекающего тока производится по схеме рис. 30. Во избежание погрешностей и образования гальванических пар (ЭДС поляризации) заземляющий электрод выполняют из того же металла, что и оболочка кабеля.

Плотность тока, сходящего с металлической оболочки кабеля в окружающую среду, является одним из важных показателей процесса электролитической коррозии в оболочке. Для бронированных кабелей опасной считается среднесуточная плотность тока 0,15 мА/кв. дм. Для голых освинцованных и

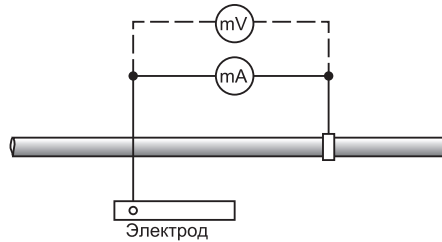


Рис. 30. Схема измерения разности потенциалов на оболочке кабеля и плотности стекающего с нее блуждающего тока.

бронированных кабелей в агрессивных грунтах опасными считаются любые анодные и знакопеременные зоны.

Большие значения блуждающих токов в свинцовых оболочках, достигающие иногда десятков ампер, вызывают также дополнительный нагрев кабелей.

Измерение производится по трассе кабеля в каждом смотровом колодце, а при их отсутствии в открытых шурфах.

При пересечении кабельных линий с рельсовыми путями потенциалы измеряют по обе стороны пути на расстоянии до 10 м. В качестве электрода применяют обычно отрезок кабеля длиной 0,5 м.

Вольтметр mV должен быть многопредельным (0 + 1; 0 + 20; 0 + 100 В) с двусторонней шкалой и большим внутренним сопротивлением (свыше 10 кОм на 1 В шкалы).

При измерении плотности тока по схеме рис. 30 применяют миллиамперметр (mA) с пределами измерения 0—10; 0—100 мА; 0—1 А и внутренним сопротивлением 1—5 Ом. В качестве электрода используют отрезок кабеля, одинакового с проверяемым, который закладывают рядом с последним на той же глубине и на расстоянии 0,3—0,5 м от него, а длину выбирают такой, чтобы площадь поверхности равнялась 5—10 кв. дм. Удельная плотность тока, стекающего с электрода в землю, определяется как

$$I_{\text{уд}} = \frac{I_{\text{э.з}}}{S},$$

где $I_{\text{э.з}}$ — измеренный ток, мА; S — площадь поверхности вспомогательного электрода, кв. дм.

Значение блуждающего тока.

Сквозной ток, протекающий вдоль оболочек кабеля, может быть измерен методом падения напряжения на определенной длине кабеля или компенсационным методом.

Метод падения напряжения применим тогда, когда известно или может быть достаточно точно подсчитано активное сопротивление $R_{\text{уч}}$ свинцовой оболочки и стальной брони кабеля на участке измерений. Измерив падение напряжения $U_{\text{уч}}$ на этом участке, находят ток

$$I_y = \frac{U_y}{R_y}.$$

Если определение сопротивления расчетом затруднительно (неизвестна толщина свинцовой оболочки, оболочка и броня заметно повреждены коррозией), целесообразно применить компенсационный метод. По участку оболочки кабеля (обычно длиной 0,8—1 м) пропускается от постороннего источника постоянный ток обратного направления, значение которого можно регулировать. В момент компенсации падение напряжения на этом участке, фиксируемое милливольтметром, будет равно нулю, а ток от источника равен сквозному току. Милливольтметр должен иметь пределы измерения 0—10; 0—100 мВ, 0—1 В, амперметр в цепи источника тока — пределы 0—5; 0—50 А.

Места подсоединения проводов к оболочкам кабелей и электроду должны быть тщательно заизолированы смоляной лентой и покрыты слоем битума.

Полярность, значение напряжений и блуждающих токов не остаются постоянными. Поэтому измерения производят несколько раз в течение 10—15 мин и вычисляют среднее значение. В знакопеременных зонах расчеты производят отдельно для положительных и отрицательных значений. Сопоставляя кривую изменения блуждающих токов с графиком движения электропоездов, можно установить источник опасных блуждающих токов и дефектные места в рельсовых путях.

Предварительные измерения с целью обнаружения блуждающих токов на оболочках кабельных линий можно производить из ТП, расположенных в зоне рельсовых путей электротяги, тяговых подстанций и ремонтных депо. При этом измерительные приборы присоединяются одним полюсом к контуру заземления, другим — к электроду (газовой трубе), забитому в землю на расстоянии 7—10 м от ТП. В остальных случаях пункты для измерений оборудуются в специальных небольших котлованах и колодцах.

Применяются следующие системы защит от блуждающих токов:

- электрический дренаж (прямой, поляризованный, усиленный) — отвод блуждающих токов к источнику этих токов;
- протекторная защита — гальванические аноды, устанавливаемые на определенном расстоянии и электрически соединенные с оболочкой кабеля;
- катодная защита — регулируемый источник тока, обеспечивающий отрицательный потенциал оболочки кабеля по отношению к земле. Применяется для защиты подземных кабелей в опасных зонах при положительном потенциале оболочки кабеля по отношению к земле.

Схемы катодной защиты кратко рассматриваются ниже на примере устройств УКЗВ и УКЗН.

Питание устройств — от сети переменного тока. Ввод питающей линии: в УКЗВ — воздушный, в УКЗН — кабельный.

Выводы линий постоянного тока в обоих устройствах — кабельные.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется путем предварительного понижения напряжения переменного тока с последующим его выпрямлением. Устройства имеют защиты от атмосферных перенапряжений, коротких замыканий, схему обогрева.

Модификация 2УКЗВ-А обеспечивает возможность автоматического регулирования защитного потенциала.

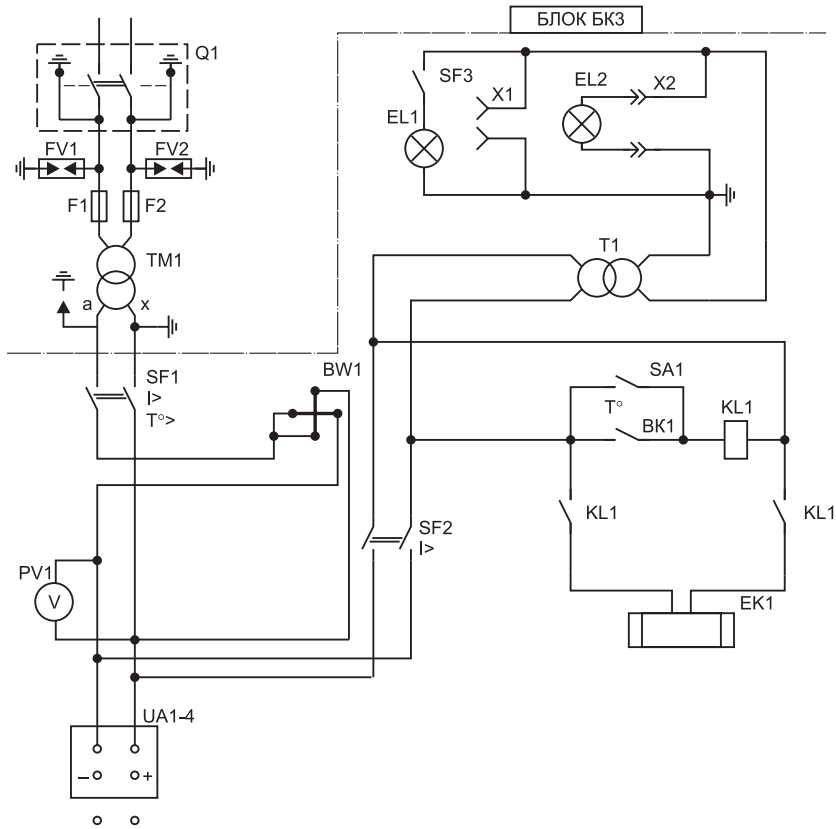


Рис. 31. Принципиальная электрическая схема УКЗВ: BW1 — счетчик; EK1 — электронагреватель; EL1, EL2 — светильники; F1, F2 — предохранители; FV1, FV2 — разрядники; KL1 — промежуточное реле; BK1 — температурное реле; PV1 — вольтметр; Q1 — разъединитель; SA1 — тумблер; SF1, SF2, SF3 — выключатели; T1, TM1 — трансформаторы; UA1-4 — агрегаты катодной защиты

14.1.6. Измерение сопротивления заземления. Производится на линиях всех напряжений для концевых заделок, а на линиях 110 кВ и выше, кроме того, для металлических конструкций кабельных колодцев и подпиточных пунктов.

На подстанциях 110 кВ и выше проверяют также сопротивление металлической связи между заземлением концевых муфт и местом заземления нейтрали трансформатора.

14.2. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ

14.2.1. Проверка изоляторов. Производится согласно п. 12.3.

14.2.2. Проверка соединений проводов. Производится путем внешнего осмотра и измерения сопротивления или падения напряжения, как для сборных и соединительных шин. Измерения желательно производить на расстоянии не менее 1 м от соединения.

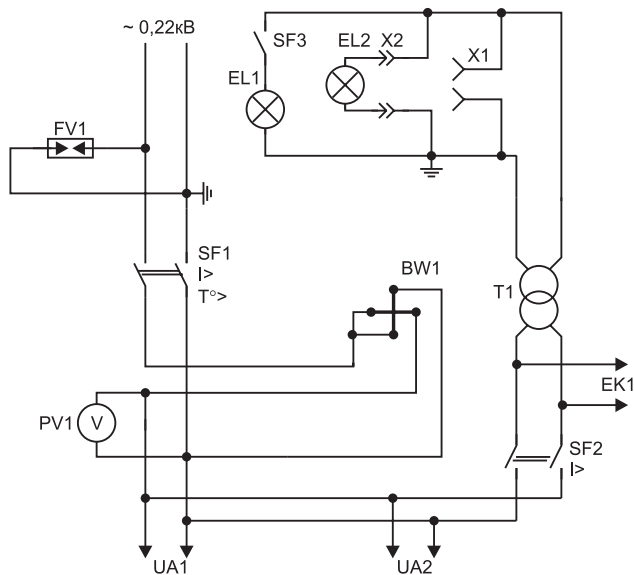


Рис. 32. Принципиальная электрическая схема УКЗН
(обозначения те же, что на рис. 31)

14.2.3. Измерение сопротивления заземления опор, их оттяжек и тросов. На ВЛ должны быть заземлены:

1) опоры, имеющие грозозащитный трос или другие устройства молниезащиты. Сопротивления заземляющих устройств при высоте опор до 50 м должны быть не более приведенных в табл. 31, более 50 м — вдвое ниже;

2) железобетонные и металлические опоры ВЛ 3—35 кВ. Сопротивления заземляющих устройств должны быть: для ВЛ 3—20 кВ в населенной местности, а также для всех ВЛ 35 кВ — не более приведенных в табл. 32, для ВЛ 3—20 кВ в ненаселенной местности в грунтах с удельным сопротивлением до $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — не более 30 Ом, а в грунтах с ρ выше $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ — не более $0,3\rho \text{ Ом}$;

3) опоры, на которых установлены силовые или измерительные трансформаторы, разъединители, предохранители и другие аппараты. Сопротивления заземляющих устройств для ВЛ 110 кВ и выше должны быть не более приведенных в табл. 32, а для ВЛ 3—35 кВ не должны превышать 30 Ом.

Таблица 32. Наибольшие допустимые значения сопротивления заземляющих устройств ВЛ

| Удельное эквивалентное сопротивление грунта ρ , Ом · м | Наибольшее сопротивление заземляющего устройства, Ом |
|---|--|
| До 100 | 10 |
| Более 100 до 500 | 15 |
| Более 500 до 1000 | 20 |
| Более 1000 до 5000 | 30 |
| Более 5000 | $6 \cdot 10^{-3}\rho$ |

4) металлические и железобетонные опоры ВЛ 110 кВ и выше без тросов и других устройств молниезащиты, если это необходимо по условиям обеспечения надежной работы релейной защиты и автоматики. Сопротивления заземляющих устройств определяются при проектировании ВЛ.

Для ВЛ, защищенных тросами, сопротивления заземляющих устройств, выполненных по условиям молниезащиты, должны обеспечиваться при отсоединенном тросе, а по остальным условиям — при неотсоединенном.

Сопротивления заземляющих устройств опор ВЛ должны обеспечиваться и измеряться при токах промышленной частоты в период их наибольших значений в летнее время. Допускается производить измерения в другие периоды с корректировкой результатов путем введения сезонного коэффициента, однако не следует производить измерения в период, когда на значение сопротивления оказывает существенное влияние промерзание грунта. Значения сезонных коэффициентов в ПУЭ и ПТЭЭП не приводятся; в табл. 33 содержатся поправочные коэффициенты табл. 40 ПЭЭП, 5-е издание.

Таблица 33. Поправочные коэффициенты к значению измеренного сопротивления заземлителя для средней полосы

| Тип заземлителя | Размеры заземлителя | t = 0,7—0,8 м | | | t = 0,5 м | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | K ₁ | K ₂ | K ₃ | K ₁ | K ₂ | K ₃ |
| Горизонтальная полоса | l = 5 м | 4,3 | 3,6 | 2,9 | 8,0 | 6,2 | 4,4 |
| | l = 20 м | 3,6 | 3,0 | 2,5 | 6,5 | 5,2 | 3,8 |
| Заземляющая сетка или контур | S = 400 кв. м | 2,6 | 2,3 | 2,0 | 4,6 | 3,8 | 3,2 |
| | S = 900 кв. м | 2,2 | 2,0 | 1,8 | 3,6 | 3,0 | 2,7 |
| | S = 3600 кв. м | 1,8 | 1,7 | 1,6 | 3,0 | 2,6 | 2,3 |
| Заземляющая сетка или контур с вертикальными электродами длиной 5 м | S = 900 кв. м | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 2,1 | 1,9 | 1,8 |
| | n > 10 шт. | | | | | | |
| | S = 3600 кв. м | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 2,0 | 1,9 | 1,7 |
| | n > 15 шт. | | | | | | |
| Одиночный вертикальный заземлитель | l = 2,5 м | 2,00 | 1,75 | 1,50 | 3,80 | 3,00 | 2,30 |
| | l = 3,5 м | 1,60 | 1,40 | 1,30 | 2,10 | 1,90 | 1,60 |
| | l = 5,0 м | 1,30 | 1,23 | 1,15 | 1,60 | 1,45 | 1,30 |

Примечание. Соответствующий коэффициент применяется, когда измерение производится:

K₁ — при влажном грунте или когда моменту измерения предшествовало выпадение большого количества осадков;

K₂ — при грунте средней влажности или моменту измерения предшествовало небольшое количество осадков;

K₃ — при сухом грунте или моменту измерения предшествовало выпадение незначительного количества осадков;

t — глубина заложения в землю горизонтальной части заземлителя или верхней части вертикальных заземлителей;

l — длина горизонтальной полосы или вертикального заземлителя;

S — площадь заземляющей сетки или контура;

n — количество вертикальных электродов.

Измерения рекомендуется производить в населенной местности, на участках с наиболее агрессивными, оползневыми, выдуваемыми и плохо проводящими грунтами.

15. Конденсаторы

15.1. Измерение сопротивления изоляции

Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ. Сопротивление изоляции между выводами и относительно корпуса конденсатора должно соответствовать заводской инструкции.

Отличительной особенностью конденсаторов, особенно косинусных, является длительное удержание заряда, повышающее опасность электропоражения. Поэтому перед присоединением к измерительной схеме проверяемый конденсатор необходимо предварительно разрядить путем соединения его выводов с землей.

У косинусных конденсаторов сопротивление изоляции измеряется как относительно корпуса конденсатора, так и между его выводами. У трехфазных конденсаторов измерение производится поочередно между каждым выводом и двумя другими выводами, которые закорачиваются и соединяются с корпусом. У конденсаторов связи и отбора мощности измеряется сопротивление изоляции между фланцами конденсатора.

15.2. Измерение емкости

Производится при температуре 15—35 °С. Измеренная емкость должна соответствовать паспортным данным с учетом погрешности измерения и приведенных в табл. 34 допусков.

Таблица 34. Наибольшее допустимое отклонение емкости конденсаторов

| Наименование или тип конденсатора | Допустимое отклонение, % |
|---|--------------------------|
| Конденсаторы для повышения коэффициента мощности и для защиты от перенапряжения | ±5 |
| Конденсаторы продольной компенсации | +5 |
| | -10 |
| Конденсаторы связи, отбора мощности и делительные | ±5 |

Измерение производят методом амперметра-вольтметра или с помощью двух вольтметров (рис. 33).

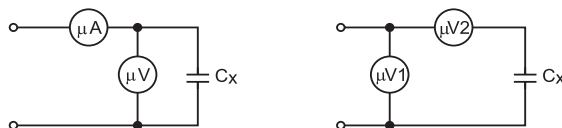


Рис. 33. Схемы измерения емкости

Расчет емкости производится по формулам:
при использовании метода амперметра-вольтметра

$$C = \frac{10^6 I}{\omega U};$$

при использовании двух вольтметров

$$C = \frac{10^6}{\omega R_2 \operatorname{tg} \varphi} = \frac{10^6}{\omega R_2 \sqrt{\left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 - 1}},$$

где C — измеряемая емкость, мкФ; I — ток, А; ω — угловая частота, 1/с; U , U_1 и U_2 — показания вольтметров соответственно V , V_1 и V_2 , В; R — сопротивление цепи вольтметра V , Ом; $\cos \varphi = U_2 / U_1$.

Измерения рекомендуется производить при напряжении 110—220 В переменного тока промышленной частоты (номинальное значение $\omega = 314$ 1/с). Возможно также определение емкости косинусных конденсаторов мостами переменного тока и цифровыми мультиметрами.

15.3. Измерение тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$

Производится для конденсаторов связи, конденсаторов отбора мощности и делительных конденсаторов. Измеренные значения $\operatorname{tg} \delta$ не должны превышать 0,3 % при температуре 20 °С.

До монтажа измерение рекомендуется производить по перевернутой схеме моста с целью уменьшения трудозатрат. То же относится и к измерению $\operatorname{tg} \delta$ (и емкости) нижних и верхних элементов собранных конденсаторов связи и делителей напряжения (в этом случае не требуется демонтировать соединения с землей нижнего элемента и ошиновки на стороне ВН). Измерение $\operatorname{tg} \delta$ (и емкости) средних элементов конденсаторов связи, делителей напряжения и отбора мощности рекомендуется производить по нормальной схеме моста.

15.4. Испытание повышенным напряжением

Значения испытательного напряжения приведены в табл. 35. Продолжительность приложения испытательного напряжения 1 мин. При отсутствии источника переменного тока достаточной мощности испытания повышенным напряжением промышленной частоты могут быть заменены испытанием выпрямленным напряжением удвоенного значения по отношению к указанным.

Испытание повышенным напряжением промышленной частоты относительно корпуса изоляции конденсаторов, предназначенных для повышения коэффициента мощности (или конденсаторов продольной компенсации) и имеющих вывод, соединенный с корпусом, не производится.

Таблица 35. Испытательное напряжение промышленной частоты конденсаторов

| Конденсаторы для повышения коэффициента мощности | | | | | | | |
|--|------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Номинальное напряжение, кВ | 0,22 | 0,38 | 0,50 | 0,66 | 3,15 | 6,30 | 10,5 |
| Испытательное напряжение, кВ | 2,1 | 2,1 | 2,1 | 4,3 | 15,8 | 22,3 | 30,0 |
| Конденсаторы для защиты от перенапряжения | | | | | | | |
| Тип | Испытательное напряжение, кВ | | | | | | |
| СММ-20/3-0,107 | 22,5 | | | | | | |
| КМ2-10,5-24 | 22,5—25,0 | | | | | | |

Испытания напряжением промышленной частоты могут быть заменены одномоментным испытанием выпрямленным напряжением удвоенного значения по отношению к указанным испытательным значениям напряжения.

15.5. Испытание батареи конденсаторов трехкратным включением

Производится включением на номинальное напряжение с контролем значений токов по каждой фазе. Токи в различных фазах должны отличаться не более чем на 5 %.

16. Комплектные распределительные устройства внутренней и наружной установки (КРУ и КРУН)

16.1. Общие сведения

КРУ предназначены для приема и распределения электрической энергии переменного тока промышленной частоты. Применение КРУ позволяет отказаться от монтажа электрооборудования, поставляемого на строительную площадку «россыпью»: все необходимое для схемы РУ оборудование монтируется в отдельных шкафах на специализированных заводах.

Выдвижной элемент относительно корпуса шкафа может занимать рабочее, контрольное (разобщенное) или ремонтное положение. В рабочем положении главные и вспомогательные цепи замкнуты, в контрольном — главные цепи разомкнуты, а вспомогательные замкнуты (в разобщенном последние разомкнуты), в ремонтном — выдвижной элемент находится вне корпуса шкафа и его главные и вспомогательные цепи разомкнуты. Усилие, необходимое для перемещения выдвижного элемента, не должно превышать 490 Н (50 кгс). При выкатывании выдвижного элемента проемы к неподвижным разъемным контактам главной цепи автоматически закрываются шторками.

Токоведущие части КРУ выполняются, как правило, шинами из алюминия или его сплавов; при больших токах допускается применение медных шин, при номинальных токах до 200 А — стальных. Монтаж вспомогательных цепей производится изолированным медным проводом сечением не менее 1,5 кв. мм, присоединение к счетчикам — проводом сечением 2,5 кв. мм, паяные соединения — не менее 0,5 кв. мм. Соединения, подвергающиеся изгибам и кручению, выполняются, как правило, многожильными проводами. Гибкая связь вспомогательных цепей стационарной части КРУ с выдвижным элементом осуществляется с помощью штепсельных разъемов.

Шкафы КРУ, а также заземляющие ножи должны удовлетворять требованиям по электродинамической и термической стойкости к сквозным токам короткого замыкания. Для обеспечения требований по механической стойкости регламентировано количество циклов, которые должны выдерживать шкафы КРУ и его элементы: разъемные контакты главных и вспомогательных цепей, выдвижной элемент, двери, заземляющий разъединитель. Количество циклов включения и отключения встроенного комплектующего оборудования (выключатели, разъединители и др.) принимается в соответствии с ПУЭ.

Для обеспечения безопасности шкафы КРУ снабжаются рядом блокировок. После выкатывания выдвижного элемента все токоведущие части главных цепей, которые могут оказаться под напряжением, закрываются защитными шторками. Эти шторки и ограждения не должны сниматься или открываться без помощи ключей или специальных инструментов. В шкафах КРУ стационарного исполнения предусматривается возможность установки ста-

ционных или инвентарных перегородок для отделения частей оборудования, находящихся под напряжением. Металлическая сетка для ограждения и перегородок должна иметь ячейки размером не более 25×25 мм. Не допускается использовать для заземления болты, винты, шпильки, выполняющие роль крепежных деталей. В местах заземления должны быть надпись «земля» или знак заземления.

Вид шкафа КРУ определяется схемой главной цепи КРУ. Основным электрическим аппаратом, определяющим конструкцию шкафа, является выключатель: применяются маломасляные, электромагнитные, вакуумные и элегазовые выключатели. Схемы вторичных цепей чрезвычайно разнообразны и полностью пока не унифицированы. Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) строятся как на электромеханических, так и на полупроводниковых элементах. В 1984 г. созданы и впервые изготовлены комплектные устройства защиты и автоматики на интегральных микросхемах типа ЯРЭ 2201 (Я — ящик, Р — полупроводниковое устройство, Э — для энергетических целей).

Специфической особенностью КРУ является оснащение камер быстродействующими дуговыми защитами. Для контроля светового потока в них используются оптико-электронные датчики на основе фотодиодов, фототиристоров, фоторезисторов, волоконно-оптические датчики и др. Типовые реле защиты строятся на микроэлектронной и микропроцессорной базе с рабочим и тормозным фотодатчиками. Последние ориентируются в сторону смежной ячейки и при КЗ в ней позволяют исключить срабатывание фотодатчиков защищаемой ячейки. С целью повышения надежности осуществляется контроль не только светового потока, но и еще по крайней мере одного признака, характеризующего дуговое КЗ, — тока или напряжения. Эти защиты обладают высокой чувствительностью и абсолютной селективностью, быстродействие — единицы или десятки миллисекунд.

В зарубежной практике характерным является отказ от применения маломасляных и электромагнитных выключателей в пользу вакуумных и элегазовых аппаратов. Создаются малогабаритные КРУ двух- и даже трехъярусного исполнения, что позволяет в 2—3 раза сократить объем помещения РУ. Широко применяется твердая изоляция токоведущих частей и аппаратов.

Выпускаются также конструкции с полностью литыми изолированными блоками. Общей особенностью новых конструкций является взаимозаменяемость выдвижных элементов с разными типами выключателей, например с вакуумными и маломасляными. Это дает возможность оптимального выбора типа выключателя и его замены в случае необходимости.

16.2. Испытания

16.2.1. Измерение сопротивления изоляции:

а) первичных цепей. Производится мегаомметром на напряжение 2,5 кВ.

Сопротивление изоляции полностью собранных первичных цепей КРУ с установленными в них узлами и деталями, которые могут оказать влияние на результаты испытаний, должно быть не менее 100 МОм.

При неудовлетворительных результатах испытаний измерение производится поэлементно, при этом сопротивление изоляции каждого элемента должно быть не менее 1000 МОм;

б) вторичных цепей. Производится мегаомметром на напряжение 0,5—1 кВ. Сопротивление изоляции каждого присоединения вторичных цепей со всеми присоединенными аппаратами (реле, приборами, вторичными обмотками трансформаторов тока и напряжения и т. п.) должно быть не менее 0,5 МОм.

16.2.2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты:

а) изоляции первичных цепей ячеек КРУ и КРУН. Испытательное напряжение полностью смонтированных ячеек при вкоченных тележках и закрытых дверях указано в табл. 36.

Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин;

б) изоляции вторичных цепей. Производится напряжением 1 кВ. Продолжительность приложения нормированного испытательного напряжения 1 мин.

16.2.3. Измерение сопротивления постоянному току. Сопротивление разъемных и болтовых соединений постоянному току должно быть не более значений, приведенных в табл. 37.

Таблица 36. Испытательное напряжение промышленной частоты изоляции ячеек КРУ и КРУН

| Класс напряжения, кВ | Испытательное напряжение (кВ) ячейки с изоляцией | | Класс напряжения, кВ | Испытательное напряжение (кВ) ячейки с изоляцией | |
|----------------------|--|------------------------------------|----------------------|--|------------------------------------|
| | керамической | из твердых органических материалов | | керамической | из твердых органических материалов |
| 3 | 24 | 21,6 | 15 | 55 | 49,5 |
| 6 | 32 | 28,8 | 20 | 65 | 58,5 |
| 10 | 42 | 37,8 | 35 | 95 | 85,5 |

Таблица 37. Допустимые значения сопротивления постоянному току элементов КРУ

| Измеряемый элемент | Допустимые значения сопротивления, мкОм |
|---|---|
| Втычные контакты первичной цепи | Если допустимые значения сопротивления не приведены в заводских инструкциях, они должны быть не более: для контактов на 400 А — 75; 630 А — 60; 1000 А — 50; 1600 А — 40; 2000 А и выше — 33. |
| Связь заземления выдвижного элемента с корпусом | Не более 0,1 Ом |

16.2.4. Механические испытания.

К механическим испытаниям относятся:

а) вкатывание и выкатывание выдвигных элементов с проверкой взаимного вхождения разъединяющих контактов, а также работы шторок, блокировок, фиксаторов и т. п.;

б) измерение силы нажатия разъемных контактов первичной цепи;

в) проверка работы и состояния контактов заземляющего разъединителя.

Производятся в соответствии с инструкциями завода-изготовителя.

16.3. Наладка

Объем работ при наладке КРУ определяется ПУЭ (см. выше), ведомственными инструкциями и указаниями заводов-изготовителей комплектующего оборудования.

К наладке приступают лишь после полного окончания строительных и электромонтажных работ. При этом должны быть проверены все болтовые соединения, заземления, протерты все изоляторы, плотно закрыты люки, проемы, лотки, двери, закрашены места сварки, восстановлены поврежденные покрытия, произведена уборка помещений. Следует убедиться, что корпуса шкафов КРУ установлены правильно: нет перекосов и качания корпуса, нижняя рама его установлена горизонтально, корпус не имеет наклона по фасаду и глубине, а фланцы элементов ячеек и кожуха элегазовых КРУ закреплены на мягких прокладках.

Особое внимание уделяется состоянию помещений для элегазовых КРУ. Здесь должны применяться пыleneобразующие краски и покрытия; во время производства работ температура в помещении должна поддерживаться на уровне 15—20 °С при относительной влажности воздуха не более 80 %. Максимальная концентрация элегаза при нормальной работе ячеек не должна превышать 0,1 %.

16.3.1. Объем пусконаладочных работ

Вначале тщательно осматривают приборы, электрооборудование и все элементы шкафов КРУ, чтобы убедиться в их исправности и комплектности.

Проверяют исправность блокировок, предотвращающих:

- вкатывание выдвигного элемента из контрольного положения в рабочее при включенном заземляющем разъединителе;
- включение заземляющего разъединителя при рабочем положении выдвигного элемента и при его промежуточном положении (между рабочим и контрольным);
- вкатывание выдвигного элемента из контрольного положения в рабочее и выкатывание его из рабочего положения в контрольное с включенным выключателем;
- включение выключателя при нахождении выдвигного элемента в промежуточном (между рабочим и контрольным) положении.

Проверяется работа:

- электромагнитной блокировки каждого шкафа КРУ;
- шторочного механизма (шторки должны легко открываться и закрываться);
- заземляющего разъединителя и его блокировок;

- механизма вкатывания;
- разъемных контактов главных и вспомогательных цепей;
- конечных выключателей разгрузочных клапанов;
- выдвижного элемента каждого шкафа (сочленение разъемных контактов главной цепи и штепсельных разъемов вспомогательных цепей, совпадение скользящих контактов выдвижного элемента, а также контактов заземляющего разъединителя при его включении).

Измеряют переходное сопротивление связи заземления выдвижного элемента с корпусом, которое не должно превышать 0,1 Ом.

Проверяют аппаратуру и схемы релейной защиты, управления и сигнализации, опробуют максимальную токовую защиту первичным током от постороннего источника.

Испытывают повышенным напряжением изоляцию главных цепей (до присоединения отходящих силовых кабелей), а также проводников и приборов вспомогательных цепей; измеряют сопротивление изоляции.

Основным узлом КРУ, влияющим на его надежность, является выдвижной элемент, в котором собрано большинство перечисленных блокировок. Нечеткая работа фиксатора выдвижного элемента может привести к ошибочному выкатыванию последнего с включенным выключателем. Если зазор между фиксатором и рычагом, который в него упирается, будет больше допустимого, может произойти деформация или поломка фиксатора. Четкая фиксация выдвижного элемента в рабочем положении свидетельствует о правильном сочленении главных разъемных контактов, а при нарушении регулировки механизма доводки подвижные контакты могут не дойти до неподвижных.

В случае отказа блокировки заземляющего разъединителя выдвижной элемент может быть установлен в рабочее положение при включенных одновременно разъединителе и выключателе.

Сбой в работе защитных шторок и приводного устройства шторочного механизма может привести к тому, что работник, находящийся в отсеке выдвижного элемента, окажется под напряжением, если шторки не полностью закрылись при выкатывании выдвижного элемента, не заперты навесным замком и т. д.

16.3.2. Основные операции.

Проверка механизма доводки и блокировки тележки. Производится в рабочем и контрольном положениях. При выводе тележки из зафиксированного положения предварительно включенный выключатель должен отключиться раньше, чем разомкнутся разъединяющие контакты в главной цепи.

Проверка действия защитных шторок. При выкатывании тележки в ремонтное положение шторки должны под действием собственного веса закрыть окна, при вкатывании — автоматически подниматься, открывая окна для прохода подвижных контактов главной цепи. При правильной регулировке верхний край нижней шторки совпадает с нижним краем верхнего проема (в открытом положении), а верхняя шторка в закрытом положении полностью перекрывает проем к неподвижным контактам главной цепи.

Проверка КРУ многократным вкатыванием — выкатыванием тележки. Проверяется работа механических блокировок, отсутствие перекосов и заеданий.

Несоосность контактов не должна превышать 4—5 мм. Вертикальный люфт ламелей разъединяющих контактов выкатной тележки должен быть в пределах 8—14 мм. Вхождение подвижных контактов в неподвижные должно быть не менее 15 мм, запас хода — не менее 2 мм.

Проверка электромагнитной блокировки заземлителя. Следует убедиться в невозможности оперирования заземлителем при отсутствии напряжения на зажимах блок-замка. С этой целью делаются попытки включить и отключить полюс заземлителя вручную при вставленном или удаленном ключе блок-замка: в обоих случаях полюс заземлителя не должен начинать выполнение соответствующей операции. При нижнем пределе напряжения на зажимах блок-замка вставляют в него ключ, деблокируют привод полюса заземлителя и производят по две операции включения—отключения. Перед выполнением каждой операции вынимают ключ из блок-замка, вновь его вставляют и деблокируют привод.

Измерение сопротивления постоянному току разъемных соединений первичной цепи, соединений сборных шин и разъединяющих контактов вторичных цепей. Производится посредством двойного измерительного моста, микроомметра, методом амперметра — вольтметра или методом сравнения с эталонным сопротивлением.

В качестве эталонного сопротивления используют шунты на номинальные токи 1500, 750 и 500 А. Измерение сопротивления токоведущего контура производят при токе 100—200 А, но не более 0,2 номинального значения тока шкафа КРУ при длительных измерениях и более 0,2 — при продолжительности измерений до 1 мин. Сопротивление разборных контактных соединений измеряют один раз, разъемных — три раза, при этом перед каждым измерением производят не менее трех включений и отключений и за окончательный результат принимают среднее арифметическое значение.

Если доступ к неподвижным контактам шкафа КРУ затруднен, измерение их сопротивления производят на тележке с помощью вспомогательной медной пластины толщиной 8—9 мм или запасного неподвижного контакта. Точки, между которыми осуществляется измерение, показаны на рис. 34.

Измерение силы нажатия ламелей разъемных контактов главной цепи подвижных элементов, разъединителей и заземляющих разъединителей. Производится выборочно при выкаченной тележке КРУ (см. рис. 34). В зазор между ламелями вставляют пластину, по толщине соответствующую неподвижному контакту. По линии нажатия на пластину закладывают лист бумаги или шуп толщиной 0,1 мм и с помощью динамометра ламель оттягивают. Показания динамометра, при котором вкладыш может быть вытянут с силой не более 0,5 Н, соответствуют давлению на неподвижный контакт (нож). Измеренное значение должно быть в пределах, регламентируемых заводскими инструкциями, и для контактов главной цепи составляет обычно 100—150 Н (10—15 кг).

Проверка регулировки разъемных вспомогательных контактов. Производится в контрольном положении. Соединение неподвижной и подвижной частей контактов должно происходить на расстоянии 7—17 мм от края пружинящих пластин, ход которых при включении контактов вспомогательной цепи должен быть не менее 5 мм. Отгибание пружинящих пластин неподвижного блока при регулировке не допускается.

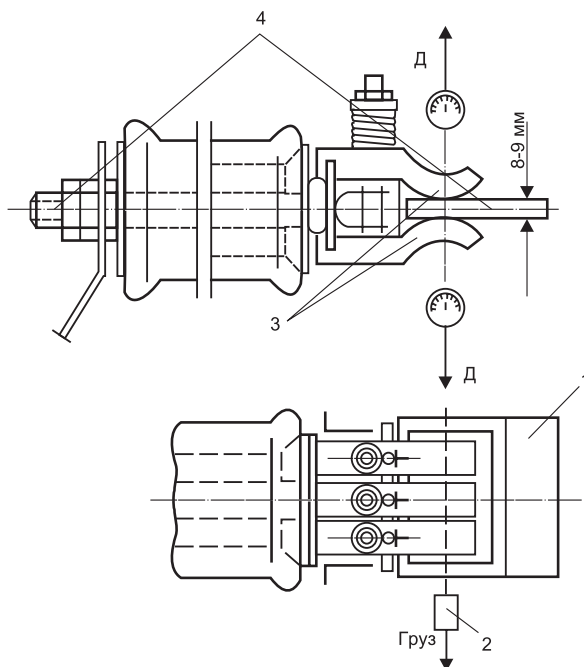


Рис. 34. Разъединяющие контакты первичной цепи. Измерение давления и переходного сопротивления контактов: 1 — пластина, соответствующая толщине неподвижного основания первичных контактов; 2 — грузик, подвешенный на вкладыше из тонкой бумаги; 3 — места крепления нитей динамометра Д; 4 — места присоединения щупов для измерения переходного сопротивления разъединяющего контакта первичной цепи

Проверка работы коммутирующего устройства внешних вспомогательных цепей разъединителя и заземлителя. При плавном ручном оперировании сигнал о включении должен появляться не раньше момента касания контактов главной цепи, а сигнал об отключении — после прохождения подвижным контактом 80 % расстояния между экранами контактов.

Проверка работы и состояния контактов заземляющего разъединителя. Для проверки заземляющего контакта между корпусом шкафа и выдвижным элементом подключают последовательно электрическую лампу и вкатывают тележку в рабочее и контрольное положения; сигнальная лампа не должна мигать.

Переходное сопротивление металлической связи заземления выдвижного элемента с корпусом измеряют между ручками выдвижного элемента и местом приварки корпуса шкафа к закладным швеллерам, на которые установлен шкаф КРУ. Измерение производят до трех раз и при неудовлетворительном значении сопротивления заземляющего контура проверяют затяжку болтов заземления, соединения отдельных элементов и деталей каркасов шкафа КРУ.

Испытание изоляции повышенным напряжением промышленной частоты. Для того чтобы испытанию подверглась вся изоляция первичных цепей (в том числе выключатель, нижние проходные и опорные изоляторы), испытания следует производить до присоединения отходящих силовых кабелей. Выдвиж-

ные элементы должны находиться в рабочем положении, выключатель и разъединитель включены, предохранители установлены, а корпус шкафа заземлен. Испытания производят пофазно при заземленных двух других фазах.

При этом силовые трансформаторы, разрядники, трансформаторы напряжения отсоединяют, вторичные обмотки трансформаторов тока закорачивают и заземляют, заземляющие разъединители отключают. Если КРУ имеют изоляционные шторки или изоляционные съемные плиты, против токопроводящих шин или контактов с наружной стороны этих шторок (плит) закрепляют электроды из фольги площадью 100 кв. см соединяют их между собой и заземляют.

Испытания электрической изоляции вакуумных выключателей проводят на установке, максимальная токовая защита которой настроена на ток утечки не более 20 мА. Если ток утечки превышает это значение, производят осмотр выключателя и после устранения выявленных дефектов повторяют испытания. Если ток утечки остается выше 20 мА, то испытывают отдельно дугогасительные камеры, и в случаях, когда ток утечки превышает 10 мА, камеры бракуются и подлежат замене.

В элегазовых КРУ повышенное напряжение прикладывают с помощью испытательных вводов и включенного последовательно защитного резистора сопротивлением 10 МОм. Испытание проводят одновременно для всей секции КРУ, поэтому все элементы его ячеек заполняют элегазом. Секционные ячейки и ячейки с двумя системами сборных шин испытываются одновременно для всех элементов обеих секций и двух систем шин. Трансформаторы напряжения при этих испытаниях отключают.

Испытания изоляции между разомкнутыми контактами разъединителей и выключателей выполняют при положении полюсов электрооборудования согласно табл. 38.

Таблица 38. Положение разомкнутых контактов полюсов электрооборудования при испытаниях повышенным напряжением элегазовых КРУ

| Электрооборудование, у которого испытывается изоляция между контакт | Положение полюсов электрооборудования | | | | |
|---|---------------------------------------|---------------------|-------------|-------------------------|---------------------------|
| | заземлителя ввода | разъединителя ввода | выключателя | заземлителя сборных шин | разъединителя сборных шин |
| Полюс разъединителя ввода | Включен | Отключен | Отключен | Отключен | Отключены |
| Полюс выключателя | Включен | Отключен | Отключен | Отключен | Включены |
| Полюс разъединителей сборных шин | Включен | Отключен | Включен | Отключен | Отключены |

После испытания повышенным напряжением проверяют течеискателем все элементы, заполненные элегазом, и пломбируют вентили и обратные клапаны.

Для опробования выключателя, установленного на выдвижном элементе, регулирования его привода, проверки релейной защиты, при подготовке и сборке схемы после окончания работ, при работах на остановленном электродвигателе и т. п. выдвижной элемент может находиться в контрольном зафиксированном положении. При работе с измерительными приборами, реле и другими аппаратами вспомогательных цепей, без выкатки выдвижного эле-

мента с электрооборудованием главных цепей, на дверях отсека выдвижного элемента (или на рукоятке его фиксатора, если нет фасадных дверей) и на месте производства работ вывешивают соответствующие плакаты.

Работы в линейном отсеке производят при отсутствии напряжения на линейных разъемных контактах, включенном заземляющем разъединителе и запертых на навесной замок шторках, закрывающих доступ к шинным разъемным контактам. Работы в отсеке выдвижного элемента производят при запертых на навесной замок шторках, запрещающих доступ в отсеки с шинными и линейными разъемными неподвижными контактами. Перед вкатыванием выдвижного элемента в корпус шкафа защитные шторки освобождают от навесных замков во избежание поломки приводного шторочного механизма.

Сопротивление заземляющих устройств измеряют, как правило, в периоды наименьшей проводимости почвы: летом — при наибольшем просыхании, зимой — при наибольшем промерзании.

Необходимо не только соблюдать общие правила безопасности при работе в КРУ, но и учитывать специфические требования, связанные с особенностями применяемого оборудования. Так, следует помнить, что в элегазовом выключателе могут образовываться токсичные соединения. Сам элегаз не токсичен и не горюч, но при его утечке снижается процентное содержание кислорода в воздухе. Особую осторожность в этом случае следует проявлять при работе в подвальных помещениях, кабельных каналах, где элегаз может застаиваться, так как он в 5 раз тяжелее воздуха. Концентрация элегаза постоянно контролируется течеискателем. В аварийных случаях можно использовать свечу: если она гаснет, в помещение входить не следует. В помещении нельзя производить каких-либо работ, пока концентрация элегаза не снизится до 0,1 %.

Отключив находящийся под напряжением вакуумный выключатель для его проверки или регулировки, следует снять остаточное напряжение с экрана камер. Защита от рентгеновского излучения при испытании изоляции выключателя напряжением с амплитудой выше 20 кВ должна соответствовать правилам работ с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения; предусматривается применение защитных экранов.

Раздел 3

УСТРОЙСТВА РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

Рассмотренные в разделе 2 аппараты и элементы входят в систему главных цепей подстанции. *Главная цепь* — это токоведущие части, включенные в цепь, предназначенную для передачи энергии. Схемы релейной защиты и автоматики (РЗА), управления, сигнализации и блокировок с соответствующими источниками питания образуют систему вторичных (вспомогательных) цепей. *Вспомогательная цепь* — это токоведущие части, включенные в цепь, предназначенную для управления, измерения, сигнализации, регулирования, обработки и передачи данных и т. д. и не являющуюся главной цепью.

В разделе 3 рассматриваются устройства РЗА электроустановок напряжением выше 1000 В. Даются краткие сведения о видах повреждений и ненормальных режимов в электроустановках, принципах построения соответствующих защит, автоматики и их элементной базе. Определения терминов даны в соответствии с ГОСТ Р.

Необходимые материалы, относящиеся к наладке устройств ниже 1000 В (автоматические выключатели, заземление), содержатся в Методических инструкциях и здесь не рассматриваются. Не приводятся также сведения о РЗА генераторов и электроустановок выше 110 кВ, противоаварийной автоматике мощных энергосистем, поскольку наладка их производится, как правило, организациями Минэнерго.

В энергосистемах, электрических сетях и на электроустановках потребителей могут возникать повреждения и ненормальные режимы. *Повреждения* нарушают работу энергосистемы и потребителей, приводят к разрушению основного электрооборудования, а *ненормальные режимы* — к отклонению напряжения, частоты или тока от допустимых значений.

Назначением релейной защиты является: а) автоматическое отключение поврежденной части сети (электроустановки) или действие РЗ на сигнал, если *повреждение* непосредственно не нарушает непрерывность электроснабжения, условия безопасности и не угрожает разрушением защищаемого объекта; б) реагирование на опасные, *ненормальные режимы* работы с действием на отключение или на сигнал.

Наиболее опасный вид повреждений — *короткие замыкания* (КЗ). *Ток короткого замыкания* — сверхток, обусловленный повреждением с пренебрежимо малым сопротивлением между точками, находящимися под разными потенциалами в нормальных рабочих условиях. *Сверхток* — ток, значение которого превосходит наибольшее рабочее значение тока электроустановки.

В целях сохранения неповрежденной части системы и ограничения области и степени повреждения устройства релейной защиты должны обеспечивать наименьшее время отключения КЗ, и, как правило, при повреждении какого-либо элемента электроустановки должен отключаться только этот элемент.

Одним из основных видов ненормальных режимов работы являются *перегрузки*. *Ток перегрузки* — сверхток в электрической цепи электроустановки при отсутствии электрических повреждений. Защиту от ненормальных режимов работы часто выполняют не быстродействующей, как защиту от КЗ, а с определенной выдержкой времени. Для учета и анализа работы РЗ действие ее фиксируется указательными приборами. Для обеспечения проверок и испытаний в схемах защит предусматривают испытательные блоки или измерительные зажимы.

К защите предъявляют следующие основные требования: селективность, быстродействие, чувствительность и надежность.

Селективность, или *избирательность*, — это способность защиты обеспечивать эффективное отключение только поврежденного элемента системы.

Быстродействие РЗ способствует ограничению масштабов разрушения оборудования, уменьшению продолжительности снижения напряжения и сохранению устойчивости параллельной работы генераторов. Полное время отключения складывается из времени работы защиты и времени срабатывания выключателя. Защиты, действующие с временем до 0,10—0,12 с, считаются быстродействующими.

Чувствительность защиты принято оценивать коэффициентом чувствительности. Для *максимальных* защит, реагирующих на величины, возрастающие в условиях повреждений (например, ток), этот коэффициент определяется как отношение расчетных значений данных величин к параметрам срабатывания защит, а для *минимальных* защит, реагирующих на параметры, уменьшающиеся в условиях повреждений (например, напряжение), — как отношение параметров срабатывания к расчетным значениям. Необходимые минимальные значения коэффициентов чувствительности для различных видов защит и защищаемых элементов регламентированы ПУЭ.

Надежность: защита должна безотказно работать при повреждениях в установленной для нее зоне и не должна ложно срабатывать в режимах, при которых ее работа не предусматривается.

Традиционные схемы РЗ строятся на отдельных реле, соединенных друг с другом по определенной схеме. *Реле* представляет собой автоматическое устройство, которое приходит в действие (срабатывает) при определенном значении (уставке) воздействующей на него входной величины (напряжения, тока, частоты и пр.). Применяются реле *электромеханические* и *бесконтактные (статические)* на полупроводниковых или ферромагнитных элементах. Полупроводниковые реле осуществляются с помощью аналоговых операционных усилителей и логических элементов или на цифровой микроэлектронной базе. Получает широкое распространение защита на базе *микропроцессорной* техники; хотя строится она не на отдельных реле, а посредством соответствующих программ, название РЗ за ней сохраняется.

Реле могут реагировать на электрические (напряжение, ток, сопротивление и др.) и неэлектрические (давление газов, температура) величины; первые

подразделяются на реле, реагирующие на одну, две, три или больше электрические величины. Различают параметры *срабатывания* реле и *возврата* его в исходное положение; отношение второго значения к первому называют *коэффициентом возврата*. Применительно к максимальным и прочим реле, кроме минимальных, наименьший ток (напряжение), при котором реле срабатывает, называют током (напряжением) срабатывания; наибольший ток (напряжение), при котором оно возвращается в исходное положение, — ток (напряжением) возврата; коэффициент возврата — меньше единицы. Ток (напряжением) срабатывания минимального реле называют наибольший ток (напряжение), при котором реле срабатывает, а ток (напряжением) возврата — наименьший ток (напряжение), при котором оно возвращается в исходное положение; коэффициент возврата — больше единицы. Реле *прямого* действия устанавливаются непосредственно в приводе выключателя (*встроенные* реле). Они отличаются простотой, надежностью, но вместе с тем большим потреблением мощности и невысокой точностью; применяются в сетях среднего напряжения 3—35 кВ, когда указанные недостатки незначительны. Защита с реле *косвенного* действия при срабатывании включает цепь катушки отключения выключателя, питание которой осуществляется от вспомогательного источника оперативного тока — переменного или постоянного.

Оперативный ток питает цепи дистанционного управления выключателями, релейной защиты и автоматики, телемеханики и сигнализации. В качестве источников *переменного* оперативного тока служат трансформаторы тока и напряжения и трансформаторы собственных нужд; применяются также предварительно заряженные конденсаторы (импульсные источники питания). В качестве источника *постоянного* тока применяются аккумуляторы и выпрямители — управляемые и неуправляемые. Чтобы получить значение напряжения, отличающееся от вырабатываемого аккумуляторной батареей, используют инверторы, выходное напряжение которых трансформируется и выпрямляется.

Для повышения надежности сеть оперативного тока секционирована. Каждая секция представляет собой шинки, питающие группы потребителей. Цепи защиты, автоматики и катушек отключения питаются от шинок управления ШУ (ЕС), цепи катушек включения, потребляющих большие токи (до сотен ампер), — от шинок ШВ (ЕУ), сигнализация — от шинок ШС (ЕН); остальные потребители (аварийное освещение, двигатели собственных нужд) питаются по отдельной сети.

Вспомогательные устройства и автоматика включают в себя цепи управления, блокировки и сигнализации, а также *противоаварийную* автоматику (АПВ, АВР, автоматическая разгрузка трансформаторов и др.) и *автоматику нормального* режима (регулирование напряжения, нагрузки, коэффициента мощности и др.), источники питания.

В ряде случаев повреждения и нарушения нормального режима работы электроустановок, вызвавшие их отключение (перекрытие изоляции, схлестывание проводов, перегрузки и др.), самоустраняются, носят кратковременный характер. В этих случаях, а также при ошибочных отключениях выключателей персоналом или неселективным действием защиты для быстрого восстановления питания потребителей или системных связей предусматриваются устройства *автоматического повторного включения* (АПВ). В механических устройст-

вах АПВ повторное включение выключателей производится за счет предварительно поднятого груза или заведенной пружины; в настоящее время не выпускаются. В схеме электрического устройства АПВ используются электрические реле различного назначения на постоянном или переменном оперативном токе.

Как правило, предусматривается ускорение действия релейной защиты на случай *неуспешного* АПВ (т. е. когда восстановление электропитания или нормальной схемы не достигается) с помощью устройства ускорения после включения выключателя. Если АПВ может привести к расширению повреждения, действие АПВ блокируется (запрещается). Применяются устройства трехфазного АПВ (ТАПВ) и однофазного АПВ (ОАПВ). Схемы устройств АПВ должны обеспечивать определенное количество повторных включений, т. е. заданную кратность действий: для однократных АПВ — один раз после аварийного отключения выключателя (цикл О—В—О), для двукратных — два раза после первого и повторного отключений (цикл О—В—О—В—О). Действие устройств АПВ фиксируется указательными реле, счетчиками числа срабатываний или другими устройствами аналогичного назначения.

Для восстановления питания потребителей путем автоматического присоединения резервного источника питания при отключении рабочего источника питания, приводящем к обесточению электроустановок потребителей, предусматриваются устройства *автоматического включения резервного питания* (АВР). Устройства АВР применяются также для автоматического включения резервного оборудования при отключении рабочего оборудования, приводящем к нарушению нормального рабочего процесса, и, кроме того, для упрощения релейной защиты. Используются пусковые органы различных типов, в том числе реагирующие на исчезновение напряжения, тока, снижение частоты, изменение направления мощности и т. п., а также на сигналы специальных датчиков (давления, уровня и др.). Успешность действия АВР составляет 90—95 %.

Схемы АВР могут иметь одностороннее или двустороннее действие. При одностороннем АВР одна из линий является рабочей, другая — резервной, при двустороннем — любая линия может быть как рабочей, так и резервной. Когда возможно включение выключателя на КЗ, как правило, предусматривается ускорение действия защиты этого выключателя. В случае совместного применения АВР и АПВ устройства АВР должны действовать при внутренних повреждениях рабочего источника, АПВ — при прочих повреждениях. После успешного действия АПВ или АВР должно, как правило, обеспечиваться возможно более полное автоматическое восстановление схемы до аварийного режима.

Наладка других видов электроавтоматики (таких как устройства автоматического регулирования возбуждения генераторов, автоматическая частотная разгрузка, системная автоматика) здесь не рассматривается.

1. Виды повреждений и ненормальных режимов

1.1. Короткие замыкания

Короткие замыкания (КЗ) происходят обычно через *переходные сопротивления* — электрических дуг, посторонних предметов в месте повреждения, опор и их заземлений, а также сопротивления между проводами фаз и землей (например, при падении проводов на землю). Для упрощения расчетов отдельные переходные сопротивления в зависимости от вида повреждения принимаются равными между собою или равными нулю («металлическое», или «глухое» КЗ).

1.1.1. Симметричные трехфазные КЗ (ТКЗ). ТКЗ при одинаковых переходных сопротивлениях называют *симметричным*. На рис. 1 показана симметричная трехфазная цепь, которая питается от *источника бесконечной мощности* (S). Условно считают, что напряжение на шинах такого источника остается неизменным при любых изменениях тока в подключенной к нему цепи, или, иными словами, его собственное (внутреннее) сопротивление (Z) пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением цепи КЗ (Z_k). При вычислении токов КЗ и уставок релейной защиты сопротивление Z можно не учитывать, если оно не превышает (5—10) % Z_k .

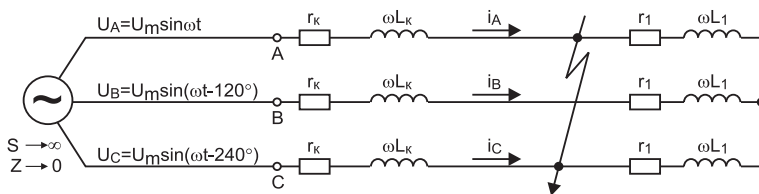


Рис. 1. Короткое замыкание в трехфазной симметричной цепи

В нормальном режиме работы амплитуда тока в цепи определяется сопротивлениями Z_k и Z_1 , а угол сдвига φ_k между током и напряжением каждой фазы — соотношением активных $r_k + r_1$ и индуктивных $x_k + x_1$ сопротивлений всей цепи, но преимущественно — параметрами нагрузки, и составляет обычно 45—90°. Короткое замыкание цепи вызывает переходный процесс в ней, в ходе которого ток можно рассматривать как сумму двух составляющих: *вынужденной* гармонической (периодической, синусоидальной) i_n и *свободной* (апериодической, экспоненциальной) i_a (рис. 2). Свободная составляющая уменьшается с постоянной времени $T_k = L_k / r_k = x_k / \omega r_k$ по мере затухания переходного процесса.

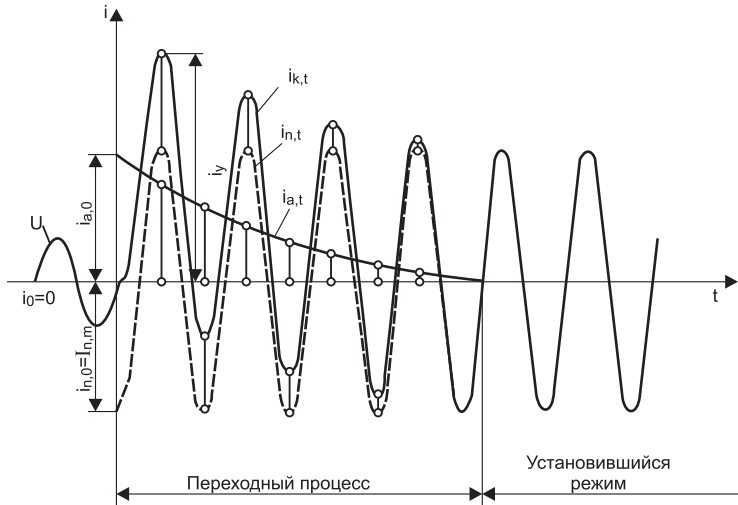


Рис. 2. Ток КЗ при наибольшем значении аперриодической составляющей

Максимальное мгновенное значение i_y суммарного тока i называется *ударным током*, а отношение последнего к амплитуде I_{nm} — *ударным коэффициентом* $k_y = i_y/I_{nm}$, причем $1 < k_y < 2$. Максимальное действующее значение I_y тока КЗ достигается за первый период переходного процесса, а его отношение к действующему значению I_{Π} периодической составляющей лежит в пределах $1 < I_y/I_{\Pi} < \sqrt{3}$.

Наибольшие значения аперриодическая составляющая i , следовательно, коэффициент k_y и пик тока I_y приобретают при следующих условиях: а) перед возникновением КЗ сеть работала в режиме холостого хода, когда ток $i = 0$; б) КЗ возникает в момент прохождения напряжения источника через нуль; в) угол фазного сдвига между током и напряжением равен 90° . Эти условия являются наиболее опасными: начальное значение i_{a0} аперриодической составляющей будет равно амплитуде I_{nm} периодической составляющей тока КЗ, так что спустя примерно 0,01 с ток i приблизится к наибольшему возможному значению. Кроме того, переходный процесс будет затухать медленно, и повышенные значения тока будут сохраняться длительное время.

Когда цепь питается от источника ограниченной мощности, рассматриваются такие повреждения, при которых сопротивление цепи КЗ равно нулю (замыкание на выводах генератора) или одного порядка с сопротивлением источника. При малой электрической удаленности места повреждения существенное влияние на переходный процесс оказывает автоматическое регулирование напряжения (возбуждения) генератора (АРВ), параметры генератора и их изменение в переходном режиме. При отключенном АРВ ударный ток имеет место через 0,01 с, а начальное значение аперриодической составляющей равно I_{nm} , как и в предыдущем случае; длительность переходного процесса для современных генераторов составляет 3—5 с.

Если АРВ включено, снижение напряжения при КЗ компенсируется увеличением тока возбуждения, причем при срабатывании форсировки возбуждение генератора нарастает до предельного значения, ЭДС генератора и ток

КЗ увеличиваются. Однако вследствие некоторого запаздывания срабатывания АРВ и инерционности цепи возбуждения генератора начальные значения тока КЗ, процесс затухания его апериодической составляющей и ударный ток остаются теми же, что и без АРВ. Глубина снижения напряжения на выводах генератора при КЗ зависит от удаленности места КЗ от генератора. При ТКЗ в удаленной точке характер изменения тока в цепи будет таким же, как и при питании от шин неизменного напряжения.

Для расчета токов ТКЗ принимается ряд допущений, упрощающих его, но с условием, чтобы погрешность не превышала 10 % (в сторону преувеличения тока). Далее составляют схему замещения и приводят ее к наиболее простому виду с тем, чтобы источник ЭДС был связан с точкой КЗ одним результирующим сопротивлением. Зная эти ЭДС и сопротивление, по закону Ома определяют начальное значение апериодической составляющей тока КЗ, затем ударный ток и, если требуется, периодическую и апериодическую составляющие тока ТКЗ.

ТКЗ являются наиболее тяжелым видом КЗ и сопровождаются наибольшим возможным снижением напряжения, однако вероятность их сравнительно невелика (1—7 %).

1.1.2. Несимметричные короткие замыкания. В трехфазных сетях могут возникать следующие виды несимметричных КЗ: двухфазное, однофазное и двухфазное на землю. Токи несимметричных КЗ в ряде случаев могут превосходить по значению токи ТКЗ. Расчет параметров несимметричных КЗ принято производить методом симметричных составляющих.

Сущность этого метода состоит в том, что любую несимметричную трехфазную систему векторных величин A, B, C (токов, напряжений) можно представить в виде геометрической (векторной) суммы трех симметричных систем: прямой A_1, B_1, C_1 , обратной A_2, B_2, C_2 и нулевой A_0, B_0, C_0 последовательно. На рис. 3 в качестве примера показано построение вектора A несимметричной системы путем суммирования векторов A_1, A_2 и A_0 (тонкие линии).

В свою очередь, симметричные составляющие получаются суммированием в определенном порядке векторов исходной системы, как это показано на рис. 3 для определения вектора A_1 . Здесь коэффициенты \mathbf{a} и \mathbf{a}^2 обозначают поворот вектора против часовой стрелки на 120 и 240 град. эл. соответственно; точка над символом указывает на векторный характер величины.

Следует отметить, что при таком построении получается вектор утроенной длины ($3A_1$, а не A_1) и потому найденное значение каждой величины необходимо делить на 3. Симметричным составляющим тока и напряжения соответствуют и сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей — активные r_1, r_2, r_0 , реактивные x_1, x_2, x_0 и полные Z_1, Z_2, Z_3 , причем для несимметричной системы

$$Z^2 = (r_1 + r_2 + r_0)^2 + (x_1 + x_2 + x_0)^2.$$

Активное, индуктивное и полное сопротивления прямой последовательности любого элемента цепи — это его сопротивления при симметричном режиме работы фаз. Для тех элементов цепи, у которых взаимоиנדукция между фазами не зависит от порядка чередования фаз, сопротивления прямой и об-

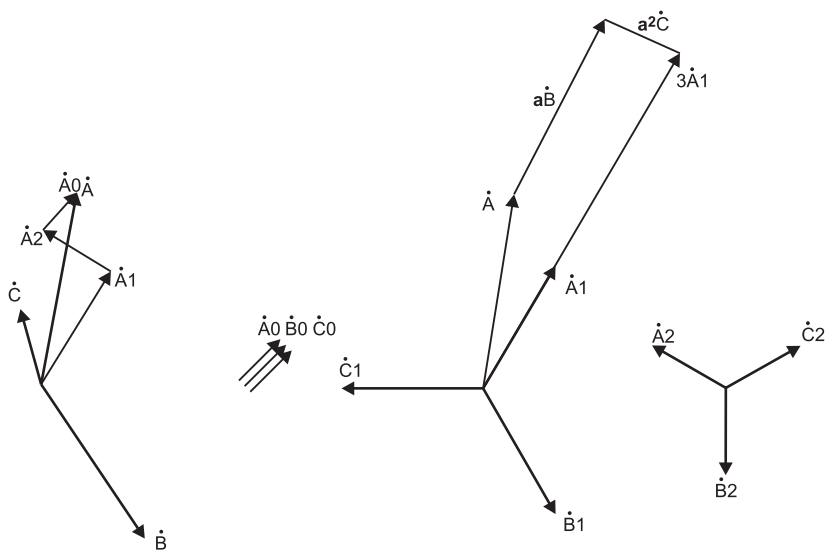


Рис. 3. Разложение несимметричной системы векторов на симметричные составляющие

ратной последовательностей одинаковы, т. е. $r_1 = r_2$, $x_1 = x_2$ и $Z_1 = Z_2$. К таким элементам относятся воздушные и кабельные линии, реакторы и трансформаторы. Для вращающихся машин в общем случае $x_1 = x_2$. Сопротивления нулевой последовательности рассматриваются в связи с замыканиями на землю. Токи нулевой последовательности замыкаются через место повреждения и нулевые точки системы.

При *двухфазном* КЗ, например между фазами В и С, фазные напряжения их равны $0,5E_A$ (E_A — ЭДС неповрежденной фазы А). Напряжения в нейтрали генератора и трансформатора (независимо от того, заземлена она или нет) равны нулю. По мере удаления от места повреждения напряжение фазы А остается неизменным, напряжения поврежденных фаз изменяются. На шинах напряжение опережающей фазы В больше, чем отстающей С. Напряжение прямой последовательности имеет наименьшее значение в месте повреждения и возрастает по направлению к источнику питания. Напряжение обратной последовательности, наоборот, максимально в точке повреждения и снижается в том же направлении.

Двухфазное КЗ на землю в сети с изолированными нейтральными (или заземленными через дугогасительные реакторы). В России это обычно сети с напряжением 3—35 кВ. От предыдущего отличаются только тем, что поврежденные фазы принужденно приобретают потенциал земли; появляется напряжение нулевой последовательности, практически одинаковое во всей сети. Нейтраль системы (трансформатора) получает по отношению к земле смещение $0,5E_A$, а напряжение неповрежденной фазы возрастает до $1,5E_A$. Вероятность возникновения 2—13 %.

Двухфазное КЗ на землю в сети с глухозаземленными нейтральными. Такие КЗ могут сопровождаться сильным снижением как междуфазного, так и фазных напряжений поврежденных фаз (до нуля в месте КЗ), и появлением со-

ставляющих нулевой последовательности не только в фазных напряжениях (как в сетях с изолированными нейтральными), но и в токах. Вероятность возникновения таких КЗ 5—20 %.

Однофазные КЗ в сети с глухозаземленными нейтральными. Являются наиболее частыми в таких сетях (60—90 %). Иногда ток однофазного КЗ (ОКЗ) превышает даже ток ТКЗ. В общем случае токи проходят по неповрежденным фазам даже при отсутствии токов нагрузки, достигая в пределе значения тока КЗ в поврежденной фазе. В фазах линии появляется ток нулевой последовательности, равный по значению $1/3$ тока КЗ, проходящего через место повреждения, и совпадающий с ним по фазе. Напряжение в точке КЗ равно $1/3$ геометрической суммы напряжений неповрежденных фаз, т. е. близко к ЭДС поврежденной фазы.

ОКЗ представляют собой тяжелый вид повреждения, хотя и менее опасный для системы энергоснабжения, чем многофазные КЗ, и должны отключаться по возможности быстро. Защита может действовать на отключение всех трех фаз линии или только одной поврежденной с последующим ее АПВ. Последний способ оказывается целесообразным для магистральных линий (преимущественно одноцепных) и в некоторых других случаях.

Однофазные замыкания на землю в сети с нейтральными, изолированными или заземленными через дугогасящие реакторы (с резонансной настройкой). Это характерный вид повреждений для сетей 3—35 кВ и частично более высокого напряжения (например, в северных районах).

Если фазы сети имеют между собой и по отношению к земле одинаковые емкости, в нормальном режиме фазные токи симметричны и сумма их равна нулю. Напряжение нейтрали относительно земли также близко к нулю. При КЗ напряжения неповрежденных фаз возрастают в $\sqrt{3}$ раз, но междуфазные напряжения остаются неизменными, к фазам нагрузки подводятся нормальные напряжения и бесперебойность питания потребителей не нарушается. Токи в месте пробоя малы и кратковременное протекание их к существенным разрушениям не приводит.

Защиту выполняют обычно с действием только на сигнал. Селективная защита часто осуществляется с помощью специальных высокочувствительных устройств, реагирующих на токи нулевой последовательности, а в сетях с дугогасящими катушками — на токи высших гармоник, поскольку для них компенсация отсутствует. В условиях повышенной опасности (например, сети 6—10 кВ торфяных предприятий) защита работает на отключение без выдержки времени.

1.2. Обрыв фаз

1.2.1. Продольная несимметрия. Продольная несимметрия наиболее ярко проявляется при кратковременном или длительном обрыве одной или двух фаз. Кратковременные разрывы одной фазы возникают при отключении в случае ОКЗ только поврежденной фазы и ее автоматическом повторном включении (ОАПВ). В сетях напряжением выше 1 кВ неустойчивые КЗ со-

ставляют более половины всех случаев и самоликвидируются при отключении, так что АПВ оказывается успешным. Кратковременные разрывы одной или двух фаз могут возникать также в результате одновременного действия фаз выключателя при его включении или отключении, длительные — при пофазном ремонте, отказе отдельных фаз и др. Обрывы фаз, как и КЗ на землю, сопровождаются появлением симметричных составляющих обратной и нулевой последовательностей токов и напряжений.

1.2.2. Обрыв фазы. В отличие от КЗ, непосредственной опасности для системы не представляет и не требует немедленной ликвидации, однако появление составляющих нулевой и обратной последовательностей может вызвать ряд нежелательных последствий. Например, составляющие обратной последовательности в токе статора генератора могут перегревать ротор, длительная несимметрия напряжений на зажимах асинхронных двигателей может оказаться недопустимой для них, токи нулевой последовательности влияют на линии связи и т. п.

Некоторые типы защит обратной и нулевой последовательностей воспринимают несимметрию при разрыве так же, как и при КЗ. Если их срабатывание нежелательно, принимаются соответствующие меры.

Неполнофазные режимы (передача энергии по двум фазам с возвратом тока через землю) могут создаваться искусственно. В этом случае возникают специфические соотношения электрических величин, которые должны учитываться при выполнении релейной защиты.

1.2.3. Обрыв двух фаз. Ток неповрежденной фазы возвращается через землю. Хотя полные токи в поврежденных фазах отсутствуют, но составляющие нулевой последовательности имеются, причем сумма фазных токов равна утроенному значению составляющей нулевой последовательности. Напряжение неповрежденной фазы за местом разрыва остается неизменным, напряжения поврежденных фаз резко снижаются.

Режимы с разрывом двух фаз реализуются редко и существуют кратковременно. С ними считаются в основном при одновременном включении или отключении фаз линии в случае, например, установки на них быстродействующих защит нулевой последовательности.

1.3. Ненормальные режимы работы

1.3.1. Сверхтоки. Сверхтоки оказывают на электрооборудование нежелательное термическое (нагревание) и электродинамическое воздействие, что может привести к ускоренному износу элементов, их повреждению и авариям.

Нагревание проводников и аппаратов происходит вследствие потерь энергии различных видов, к которым относятся: потери в активных сопротивлениях, пропорциональные квадрату тока; потери в диэлектриках, пропорциональные квадрату напряжения; потери в магнитопроводах от вихревых токов и гистерезиса; потери в массивных ферромагнитных частях от индуцированных токов и перемагничивания. Способность аппарата и проводника противостоять

ять кратковременному тепловому действию сверхтока без повреждений называют *термической стойкостью*. Для медных контактов превышение температуры контактной поверхности над температурой окружающей среды на $\theta = 180^\circ\text{C}$ соответствует началу размягчения металла, на 1065°C — его плавлению. Непосредственно измерить температуру контактной поверхности невозможно, однако ее можно определить косвенно путем измерения падения напряжения ΔU на контакте по следующим ориентировочным данным:

| | | | | | |
|------------------------------------|------|------|------|------|------|
| $\Delta U, \text{В}$ | 0,05 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 |
| $\theta, ^\circ\text{C}$ | 45 | 130 | 370 | 700 | 990 |

Можно также найти температуру из формулы для сопротивления контакта

$$R = R_0(1 + 2/3\alpha\theta),$$

где R_0 — сопротивление контакта при температуре окружающей среды; α — температурный коэффициент сопротивления; $\alpha = 0,0039$ (медь), $0,0049$ (алюминий), $0,0062$ (сталь), $1/\text{град}$.

Силы взаимодействия проводников с током называют электродинамическими или электромагнитными, а способность противостоять им — *электродинамической стойкостью*. Эти силы пропорциональны квадрату тока и достигают наибольших значений при коротких замыканиях. Действию их подвержены все элементы электрических систем, в том числе токопроводы и аппараты. Колебания проводников токопроводов под действием электродинамических сил переходят в свободные затухающие колебания после отключения КЗ. При неуспешном АПВ свободные колебания переходят в сложные вынужденные, из-за чего нагрузки на опоры и усилия в проводниках резко увеличиваются. Когда провода проложены в пучках, возникают электродинамические силы, стремящиеся сблизить провода. Вследствие изгиба тяжение проводов увеличивается. В пофазно экранированных токопроводах непрерывная замкнутая система кожухов, охватывающая проводники с током, обеспечивает в рабочем режиме почти полную компенсацию внешнего магнитного поля токопровода, так что в окружающих стальных конструкциях не возникают сколько-нибудь заметные потери мощности и механические напряжения. Электродинамические силы, действующие на проводники при КЗ, обусловлены в основном аperiодической составляющей тока; они в несколько раз меньше, чем при отсутствии кожухов.

1.3.2. Колебания напряжений и токов при качаниях. Явления, называемые *качаниями*, возникают при нарушении синхронной работы генератора и электрической системы. Кратко сущность их можно пояснить следующим образом. При нормальной работе векторы ЭДС одноименных фаз генератора и системы вращаются синхронно (с одинаковой частотой вращения) и совпадают по фазе, так что разность их равна нулю и уравнивательные токи отсутствуют. Когда нормальный режим работы генератора почему-либо нарушается и его частота вращения изменяется, эти вектора начинают расходиться, а разность их возрастает от нуля до максимального значения (суммы ЭДС) по закону синуса. Так же будет изменяться и уравнивательный ток — *ток качания*, достигая максимума при угле между векторами ЭДС, равном 180 град. эл. На-

пряжение в данной точке сети определяется как разность между ЭДС и падением напряжения от тока качания, а соответствующее сопротивление — как частное от деления напряжения на ток качания. Ток и напряжение имеют пульсирующий характер, изменение сопротивления отображается U-образными кривыми.

В результате работы регуляторов турбин генератор может продолжить работу в синхронном режиме. Но возможен случай, когда ротор машины начнет ускоряться, устойчивость ее работы нарушается, машина «выпадает» из синхронизма и переходит в *асинхронный режим*. Напряжение и ток достигают при этом своих предельных значений. Однако и в этом случае под влиянием тормозящего асинхронного момента генератор может втянуться в синхронизм (так называемая ресинхронизация), причем этот процесс носит достаточно длительный характер.

При качаниях и асинхронном ходе возникают условия для неправильных действий релейной защиты — ложных срабатываний или отказа. Большинство защит воспринимают качания как симметричное КЗ. Могут действовать защиты всех типов, реагирующие на фазные или линейные значения напряжений и токов и соотношений между ними, за исключением дифференциальных защит. Поэтому в устройствах РЗ, подверженных влиянию токов качания и асинхронного хода, принимают специальные меры, предотвращающие ложную работу защит, а именно: а) уставка пусковых реле защиты выбирается таким образом, чтобы они не действовали при качаниях; б) вводится выдержка времени на срабатывание порядка 1—2 с; в) применяются блокирующие устройства, выводящие защиту из действия. Блокировки строятся по двум основным принципам: 1) использование несимметрии тока или напряжения, появляющейся при КЗ; 2) учет скорости изменения тока и напряжения: при КЗ они возрастают скачкообразно, при качаниях и асинхронном ходе — постепенно, плавно.

1.3.3. Броски тока намагничивания трансформаторов и автотрансформаторов (далее — трансформаторов). Как известно, броски тока при включении трансформатора могут кратковременно превышать номинальный ток в несколько раз (до 6—8 раз), особенно при наличии остаточного потока в магнитопроводе, совпадающего по знаку с потоком переходного режима. Физическая сторона этого явления была пояснена в разделе 1. Броски эти, как правило, остаются меньше максимальных переходных токов сквозных КЗ, могут содержать большую апериодическую составляющую и значительный процент высших гармоник, прежде всего второй; затухание броска происходит медленнее, чем токов КЗ. Максимальная токовая защита мгновенного действия (отсечка) должна быть отстроена от броска тока намагничивания трансформатора, для чего уставка отсечки выбирается больше броска тока.

1.3.4. Токи самозапуска. Сверхтоки возникают, в частности, после отключения поврежденного элемента защитой, после действия АПВ, АВР и т. п. и могут в несколько раз превышать максимальный рабочий ток линии. Это объясняется тем, что большинство электроприемников при включении под напряжение потребляет больший ток, чем в рабочем режиме при нормальной нагрузке (электродвигатели, лампы накаливания и др.), и, кроме того, одно-

временно вводится в действие группа электроприемников. Увеличение тока учитывается при расчете релейной защиты так называемым коэффициентом пуска, значение которого для электроустановок потребителей колеблется обычно в пределах от полутора до трех.

При восстановлении нормального питания неотключившиеся от сети, частично заторможенные или остановившиеся двигатели могут самостоятельно восстановить свою частоту вращения. Автоматическое восстановление нормальной работы двигателя после кратковременного нарушения питания называется *самозапуском*. Пусковой ток $I_{\text{п}}$ остановленного двигателя можно найти в каталоге, заводской документации или, если известны значения номинального $s_{\text{н}}$ и критического $s_{\text{к}}$ скольжения, рассчитать по приближенной формуле:

$$I_{\text{п}} = I_{\text{н}} \sqrt{1 + (s_{\text{к}}/s_{\text{н}})^2},$$

где $I_{\text{н}}$ — номинальный ток.

Если двигатель включается при пониженном напряжении, пусковой ток пропорционально уменьшается. Считается, что самозапуск двигателя будет успешным, если напряжение будет не меньше 55—65 % номинального. Низкий уровень напряжения, большие токи самозапуска, затягивание времени восстановления напряжения могут вызвать срабатывание токовых защит и защит минимального напряжения. Длительное протекание тока самозапуска приводит к перегреву двигателя. Токовые защиты не должны срабатывать при самозапуске и иметь минимальное время на отключение КЗ; время срабатывания АВР должно быть минимальным.

Нарушение устойчивости синхронного двигателя возможно при понижении напряжения сети, перегрузке двигателя или снижении возбуждения. При нарушении синхронизма частота вращения двигателя уменьшается и он переходит в асинхронный режим. Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке, вызывают их повышенный нагрев, поэтому длительная работа синхронных двигателей в асинхронном режиме с нагрузкой больше 0,4—0,5 номинальной недопустима. Защита от асинхронного режима должна или осуществить ресинхронизацию двигателя, или отключить его.

При самозапуске синхронных двигателей обмотка возбуждения наглухо подключается к возбудителю, вследствие чего увеличивается тормозной момент. Самозапуск возможен, если тормозной момент будет меньше асинхронного и входного моментов. На время исчезновения напряжения при АПВ или АВР двигатель работает в генераторном режиме и при восстановлении питания возможно его несинхронное включение. В обоих случаях производится ресинхронизация.

Ток самозапуска трехфазных двигателей, питающихся через трансформатор или реактор, будет:

$$I_{\text{сз}} = \frac{U_{\text{с}}}{\sqrt{3}(x_{\text{т}} + z_{\text{п}})},$$

где $x_{\text{т}}$ — сопротивление трансформатора или реактора; $z_{\text{п}}$ — результирующее сопротивление самозапускающихся двигателей; $U_{\text{с}}$ — напряжение сети.

Формула дает несколько завышенное значение тока, так как пренебрегают сопротивлением линии, активным сопротивлением трансформатора и сопротивлением питающей системы; суммирование реактивного и полного сопротивлений производится арифметически. Сопротивление трансформатора мощностью S находят по выражению:

$$x_{\text{т}} = \frac{e_{\text{к}} \% U_{\text{с}}^2}{100S},$$

а результирующее сопротивление двигателей рассчитывается как параллельное соединение n сопротивлений:

$$\frac{1}{z_{\text{п}}} = \frac{1}{z_{\text{д1}}} + \frac{1}{z_{\text{д2}}} + \dots + \frac{1}{z_{\text{дn}}}.$$

Сопротивление двигателя можно найти по формуле:

$$z_{\text{д}} = \frac{U_{\text{с}}}{3I_{\text{п}}}.$$

Остаточное напряжение:

$$U_{\text{ост}} = U_{\text{с}} \frac{z_{\text{д}}}{z_{\text{д}} + z_{\text{т}}}.$$

2. Виды защит

2.1. Токовые и токовые направленные защиты

2.1.1. Основные понятия. *Токовыми* называют защиты, реагирующие на сверхток, проходящий по защищаемому элементу. *Токовыми направленными* называют защиты, реагирующие на ток и направление (знак) мощности КЗ в месте их включения и отличающиеся наличием органа направления мощности. Максимальная токовая защита (МТЗ) состоит из пускового органа, который выявляет появление сверхтока (например, момент возникновения КЗ) и производит пуск защиты, и замедляющего органа (органа выдержки времени), служащего для обеспечения селективности. При использовании в качестве пусковых органов реле мгновенного действия выдержка времени создается отдельными реле времени, а защита такого типа называется МТЗ с *независимой* выдержкой времени. Некоторые реле содержат встроенный замедляющий орган, благодаря которому время действия реле зависит от кратности тока: чем больше ток, тем быстрее срабатывает реле. Это — защита с *зависимой* характеристикой. Если характеристика МТЗ содержит и зависимую, и независимую части, она называется *ограниченно зависимой*.

2.1.2. Защита плавкими предохранителями. Широко используется в распределительных сетях, когда предохранители по своим параметрам удовлетворяют требованиям защищаемой электроустановки. Недостаток — возможность возникновения несимметричного режима вследствие перегорания плавкой вставки только в одной фазе (за исключением мало распространенных предохранителей с открытой плавкой вставкой и управляемых). Плавкие пре-

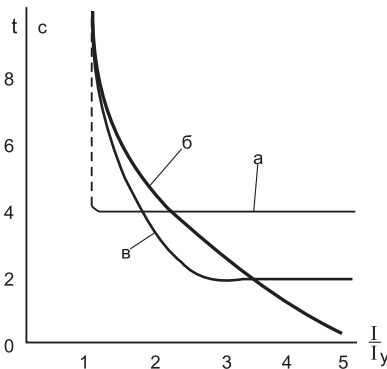


Рис. 4. Характеристики время—ток максимальной токовой защиты: а — независимая; б — зависимая; в — ограниченно зависимая; I/I_y — кратность тока, проходящего через реле, по отношению к току уставки I_y ; t — время срабатывания

дохранители выбираются с таким расчетом, чтобы их защитная характеристика располагалась ниже кривой перегрузочной способности защищаемого аппарата.

Ориентировочно допустимое время прохождения тока трехфазного КЗ на выводах НН трансформатора мощностью до $1,6 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ можно определить по выражению $t_d \approx 0,09 \epsilon_k^2$, где ϵ_k — дано в %, причем время t_d не должно превышать 5 с.

2.1.3. Схемы включения МТЗ. Наиболее распространены защиты, выполняемые с помощью максимальных реле тока — первичных реле прямого действия, встраиваемых непосредственно в приводы выключателей, или вторичных с действием на промежуточные реле. В сетях переменного тока 6—35 кВ с изолированной нейтралью чаще всего применяется включение вторичных реле тока в две фазы (рис. 5).

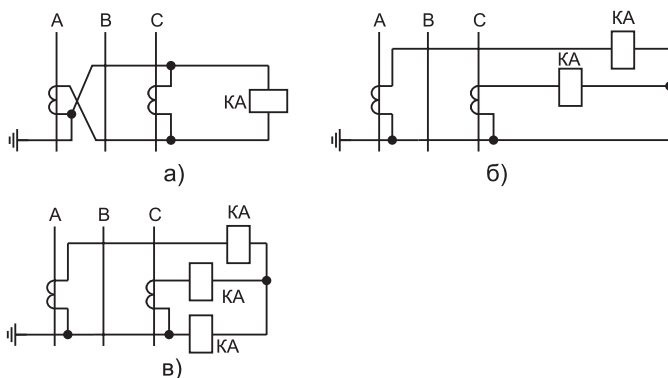


Рис. 5. Схемы включения реле тока в две фазы: а — на разность фазных токов («восьмерка»); б — на два фазных тока; в — с включением дополнительного реле на сумму двух фазных токов

Приведенные схемы отличаются друг от друга чувствительностью к различным видам КЗ. При двойных замыканиях на землю в 2/3 случаев будет отключаться только одно место повреждения.

В комплектных полупроводниковых устройствах МТЗ, а также в полупроводниковых реле тока используется односистемное выполнение исполнительного органа. Комплектные устройства типа ЯРЭ-2201, например, содержат блоки входных преобразователей с промежуточными трансформаторами тока и выпрямительными мостами, соединенными последовательно и нагруженными на последовательно соединенные резисторы. С этих блоков подается входной сигнал на общий токовый измерительный орган, выполненный на полупроводниковых элементах и реализующий требуемые характеристики с зависимой или независимой выдержкой времени или без нее (отсечка).

2.1.4. Уставки МТЗ. Ток срабатывания защиты выполняется с учетом следующих условий: 1) защита должна быть отстроена от максимального тока нагрузки, в том числе от токов самозапуска; 2) защита должна надежно действо-

вать при КЗ на защищаемом участке (коэффициент чувствительности не менее 1,5) и, как правило, на смежном участке (коэффициент чувствительности не менее 1,2).

При определении вторичного тока через реле следует учитывать схему их включения в цепи трансформаторов тока. С этой целью в расчет вводится коэффициент схемы $k_{сх}$, равный 1 при включении реле на фазные токи и $\sqrt{3}$ при включении на разность фазных токов. Учитывают также погрешности расчета токов КЗ, погрешности измерительных органов тока, а также схемы включения МТЗ на смежных участках.

Выбор выдержки времени МТЗ производится с таким расчетом, чтобы время действия защиты на каждом последующем участке (в направлении от потребителей электроэнергии к источнику питания) было на ступень Δt больше, чем на предыдущем. При этом всегда с наименьшим временем будет работать защита поврежденного участка. Ступень селективности составляет обычно 0,4—0,6 с.

2.1.5. МТЗ с блокировкой минимального напряжения. Применяется в тех случаях, когда отстройка от броска тока нагрузки приводит к чрезмерному загроблению защиты, при котором не обеспечивается необходимая чувствительность. Типовая схема содержит пусковые токовые реле мгновенного действия и три блокирующих реле минимального напряжения. Защита может подействовать на отключение только при условии, если сработают одновременно и токовые, и минимальные реле, что бывает лишь при КЗ. Для обеспечения действия защиты не только при трехфазных, но также и при однофазных КЗ дополнительно устанавливают одно реле максимального напряжения, обмотка которого включается на напряжение нулевой последовательности, а контакт — параллельно контактам реле минимального напряжения.

2.1.6. Токовая отсечка. В большинстве случаев действует мгновенно. Селективность достигается не выдержкой времени, а ограничением зоны действия защиты. С этой целью отсечка отстраивается не от тока нагрузки, а от тока при КЗ в конце защищаемой линии или в какой-либо другой точке, где отсечка не должна действовать. Принцип действия отсечки основан на том, что ток убывает при удалении места КЗ от источника питания, поскольку увеличивается сопротивление до места КЗ. Токовая отсечка может действовать только при близких КЗ и является дополнительной защитой. Удлинение зоны действия достигается применением неселективной отсечки в сочетании с устройствами АПВ или АВР. После неселективного действия отсечки при внешнем повреждении последующее действие устройств автоматики восстановит питание потребителей, если поврежденный элемент успел отсоединиться.

2.1.7. Особенности выполнения МТЗ сетей 6 и 10 кВ. Защита трансформаторов *городских кабельных сетей* выполняется главным образом с помощью предохранителей, кабельных линий — на максимальных реле тока с ограниченно-зависимыми характеристиками. Токовая отсечка, как правило, не устанавливается. Основную нагрузку составляет бытовая, характеризующаяся малой долей электродвигателей, в связи с чем коэффициент самозапуска принимается обычно равным 1,2—1,3. МТЗ выполняется обычно на переменном

оперативном токе. Уровень токов КЗ, как правило, высок, из-за чего могут возникать проблемы надежной работы контактов токовых реле.

Схемы и аппаратура МТЗ в сетях *промышленных предприятий* такие же, как и в городских кабельных сетях. Однако наличие двигательной нагрузки вызывает необходимость заглубления защит и повышения их быстродействия. При расчетах токов КЗ следует учитывать подпитку от электродвигателей. Количество операций выключателями существенно больше, чем в городских кабельных сетях, поэтому предпочтение отдается наиболее надежным типам выключателей и приводов.

Основные трудности при выполнении МТЗ в сетях *сельской электрификации* вызваны большой протяженностью ВЛ 6 и 10 кВ и малым сечением проводов на удаленных участках, так как в этих случаях ток КЗ оказывается соизмеримым с наибольшим током нагрузки на головных участках ВЛ. Двигательная нагрузка в среднем относительно невелика, и коэффициент самозапуска принимается равным 1,1—1,2 при минимальном времени срабатывания защиты 0,5 с. В сетях, питающих крупные животноводческие комплексы, доля двигательной нагрузки практически та же, что и на промышленных предприятиях.

Токовые отсечки находят, как правило, ограниченное применение. Возможно применение неселективной токовой отсечки, которая может быть исправлена в цикле АПВ.

2.1.8. Токовая направленная защита. Максимальные токовые направленные защиты используются для защиты линий и позволяют осуществить достаточно быстрое и селективное отключение повреждений в сетях с двусторонним питанием, кольцевых сетях и некоторых других. Применение органов направления мощности позволяет выполнить две системы защиты, каждая из которых приходит в действие только при одном направлении мощности. Реле направления мощности могут включаться как на полные токи и напряжения, так и на токи и напряжения отдельных симметричных составляющих.

Составляющие обратной последовательности появляются при всех несимметричных КЗ, а составляющие нулевой последовательности — только при КЗ на землю. В то время как напряжение прямой последовательности в месте КЗ минимально, а мощность направлена от источника к месту повреждения, напряжения обратной и нулевой последовательностей в месте КЗ имеют наибольшее значение, а мощность направлена от места повреждения к источнику. Особенностью составляющих обратной и нулевой последовательностей является также относительно малый диапазон изменения угла сдвига между напряжениями и токами, который практически не зависит от нагрузки, и поэтому реле направления мощности обратной и нулевой последовательностей работают при углах, близких к углу максимальной чувствительности. Использование симметричных составляющих позволяет выполнить односистемные органы направления мощности.

Принцип действия защиты можно пояснить на примере сети, состоящей из цепочки одиночных линий с двусторонним питанием (рис. 6). Принятое направление срабатывания защит 1—6 условно показано стрелками. По направленности действия защиты разбиты на две группы: четные 2, 4, 6 и нечетные 5, 3, 1. Четные защиты могут срабатывать только при КЗ слева от места

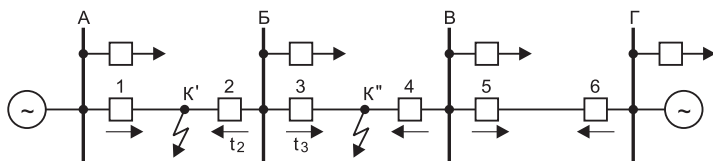


Рис. 6. Размещение токовых направленных защит в сети с двусторонним питанием; t_2, t_3 — выдержки времени защит 2 и 3

их включения, нечетные — только справа от него. Это дает возможность выбирать параметры (выдержки времени и токи срабатывания) защит для каждой группы независимо от другой.

В токовых направленных защитах от *междуфазных* КЗ органы направления мощности включаются, как правило, на полные токи и напряжения. Если включить реле на междуфазное напряжение и соответствующую разность фазных токов, то при близких междуфазных КЗ, когда линейное напряжение поврежденных фаз мало, реле может не сработать. Мощность, подводимая к реле, может оказаться недостаточной для его действия и при неблагоприятном значении угла между током и напряжением. Поэтому в направленных защитах применяются искусственные схемы, где в качестве поляризующей величины выбирают линейные напряжения, связанные с неповрежденной фазой. Эти схемы именуется по значениям углов между током и напряжением в симметричном трехфазном режиме при условии, что токи в фазах совпадают с одноименными напряжениями. Наиболее удачной считается так называемая 90-градусная схема, в которой используются линейное напряжение двух фаз и ток третьей фазы, например напряжение U_{BC} и ток I_A (рис. 7).

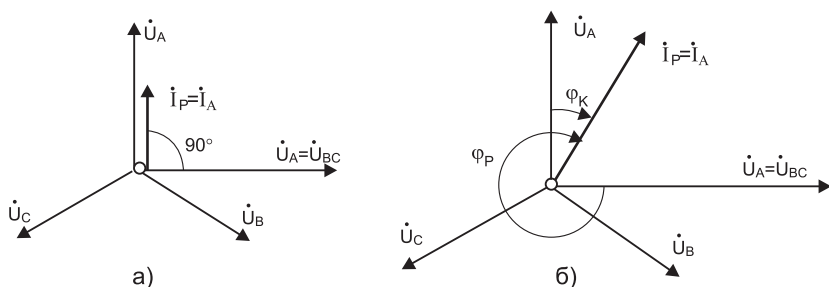


Рис. 7. 90-градусная схема включения реле направления мощности: а — нормальный симметричный режим; б — ТКЗ; φ_K — угол сдвига между напряжением и током фазы А при КЗ; φ_P — угол сдвига между напряжением и током, подводимыми к реле при КЗ

Нечувствительность защиты характеризуют *мертвой зоной* — длиной защищаемого участка, в пределах которой при *металлическом* ТКЗ происходит отказ защиты из — за того, что подводимая к зажимам реле мощность оказывается недостаточной для его срабатывания. Длина мертвой зоны зависит от чувствительности и типа реле, тока КЗ и параметров защищаемого присоединения. При 90-градусной схеме включения мертвая зона может быть только в случае металлического ТКЗ.

Времятоковые характеристики защиты могут быть как независимыми, так и ограниченно зависимыми или зависимыми. Выбор выдержек времени производится по ступенчатому принципу с учетом направленности действия защиты, т. е. с согласованием их в одном направлении, причем наиболее удаленная от источника питания защита действует мгновенно (отсечка).

2.2. Дистанционные защиты

2.2.1. Назначение и принцип действия. *Дистанционной* называется защита, выдержка времени которой автоматически изменяется в зависимости от расстояния между местом КЗ и местом установки защиты — *дистанции*. Эта величина определяется с использованием измерительных *органов сопротивления*, реагирующих на отношение остаточного напряжения на шинах к току КЗ, которое при металлическом КЗ пропорционально дистанции. В качестве измерительного органа используются реле сопротивления, непосредственно реагирующие на полное, активное или реактивное сопротивление. Обычно применяются дистанционные защиты полного сопротивления.

Выдержка времени защиты нарастает плавно или ступенчато с увеличением дистанции. При этом ближайшая к месту повреждения дистанционная защита имеет меньшую выдержку времени, чем более удаленные защиты, благодаря чему автоматически обеспечивается селективное отключение поврежденного участка. Для обеспечения селективности в сетях сложной конфигурации дистанционные защиты выполняются направленными, действующими только в направлении мощности КЗ от шин в линию, а выдержки времени защит одного направления взаимно согласовываются. Обычно защита осуществляется с тремя ступенями времени, соответствующими трем зонам ее действия. Направленность действия обеспечивается применением обычных реле направления мощности или иным путем.

2.2.2. Элементы дистанционной защиты. Защита состоит из следующих органов:

- 1) пускового органа в виде реле полного сопротивления или токовых реле;
- 2) дистанционного органа, определяющего удаленность места КЗ. В ступенчатых защитах выполняется с помощью реле минимального сопротивления. К реле подводятся ток и напряжение защищаемой линии, и оно срабатывает при условии $z_p = \frac{U}{I} \leq z_{cp}$, где z_{cp} — наибольшее сопротивление срабатывания реле. Сопротивление z_p иногда называют фиктивным, так как в некоторых случаях оно не является собственно сопротивлением линии, а зависит от нагрузки и пр.;
- 3) органа выдержки времени, с которой в зависимости от поведения дистанционного органа действует защита; выполняется в виде реле времени;
- 4) органа направления мощности, запрещающего работу защиты при направлении мощности КЗ к шинам подстанции (если пусковые и дистанционные органы не обладают направленностью);
- 5) блокировок, не допускающих действия защиты в тех режимах, где она может ложно сработать при отсутствии повреждения.

Реле сопротивления ранее выполнялись на электромагнитном и особенно на индукционном принципе, в настоящее время выпускаются реле на полупроводниках. Принцип действия всех типов реле основан на сравнении по абсолютному значению или по фазе двух векторов напряжений, являющихся функциями тока и напряжения сети. В электромеханических конструкциях осуществляется сравнение соответствующих электромагнитных моментов, напряжений или магнитных потоков, в полупроводниковых используются схемы сравнения на выпрямленном токе, основанные на балансе токов или напряжений.

Дистанционные органы, выполняемые с помощью реле сопротивления, должны включаться на ток и напряжение сети по таким схемам, при которых сопротивление z_p на зажимах реле пропорционально расстоянию до места повреждения и не зависит от вида КЗ. Поэтому дистанционные органы включаются на ток и напряжение цепи короткого замыкания. Для обеспечения правильного действия защиты при двухфазных КЗ устанавливаются три органа, реагирующие на повреждения между фазами, или один орган с переключением его на напряжение и токи соответствующих фаз в зависимости от того, какие из них повреждены. Дистанционные органы, реагирующие на междуфазные КЗ, могут включаться: на междуфазные напряжения и разность фазных токов; междуфазное напряжение и фазный ток; разность токов двух фаз. При двойных замыканиях на землю (в сетях с малым током замыкания на землю) защита должна отключать только одно место повреждения. Один комплект дистанционных органов часто используется для первой и второй зон защиты: нормально реле включено с уставкой для первой зоны, а при КЗ за ее пределами уставка автоматически изменяется пусковыми реле по истечении времени, необходимого для действия первой зоны.

Пусковые органы. В односистемных защитах и в защитах с одним комплектом дистанционных (измерительных) органов на две зоны пусковые органы подготавливают схему к правильной работе при КЗ, выполняя следующие функции: 1) запускают реле времени всех зон; 2) автоматически изменяют сопротивление срабатывания измерительных органов с первой зоны на вторую; 3) при КЗ подводят к измерительным органам токи и напряжения поврежденных фаз; 4) действуют в качестве резервной зоны защиты. В трехсистемных защитах с самостоятельными комплектами измерительных органов для каждой зоны специальных пусковых органов не требуется.

В качестве пусковых органов применяются главным образом токовые реле и реле полного сопротивления. Поскольку эти реле реагируют на качания и не полностью отвечают требованиям к пусковым реле, они дополняются блокировками от качаний. Применяются и особые блокирующие реле (называемые иногда шорами или фазоограничителями), которые позволяют ограничить действие пусковых реле при перегрузках.

2.2.3. Характеристики. *Характеристикой срабатывания* дистанционных реле называется зависимость $z_{cp} = f(\varphi_p)$, которая определяет значения сопротивления z_p на зажимах реле при его срабатывании. Сопротивление z является комплексной величиной и графически может быть представлено вектором в системе координат $r-x$ как сумма активной и реактивной (индуктивной) составляющих (рис. 8а). Любой участок сети также можно представить в осях

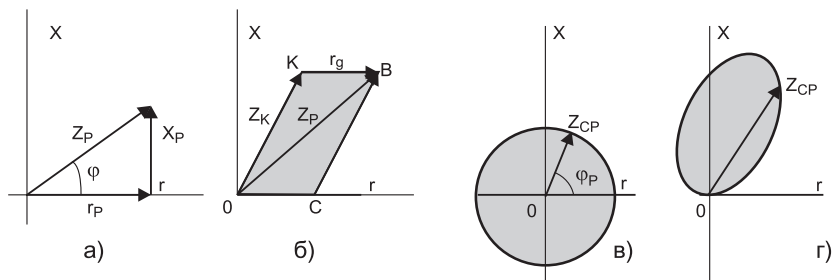


Рис. 8. Векторные диаграммы и характеристики срабатывания реле сопротивления

r — x вектором $z_{л}$, имея в виду, что каждая точка линии характеризуется определенными значениями сопротивлений $r_{л}$ и $x_{л}$. При КЗ сопротивление z_p на зажимах реле равно геометрической сумме сопротивлений линии z_k до места повреждения К и сопротивления $r_{д}$ электрической дуги (рис. 8б). Отрезок ОК определяет сопротивление линии, отрезок KB — сопротивление электрической дуги.

Контур ОКВС ограничивает область, в пределах которой может располагаться вектор z_p при КЗ в различных точках линии. Характеристика срабатывания каждого реле представляет собой геометрическое место точек, удовлетворяющих условию $z_p = z_{cp}$. Наиболее распространенные характеристики имеют вид окружности (рис. 8в), эллипса (рис. 8г), прямой линии, многоугольника. Заштрихованная часть, где $z_p < z_{cp}$, соответствует области действия реле, тогда как при $z_p > z_{cp}$ реле не работает. Таким образом, характеристика срабатывания является пограничной кривой, определяющей условия действия реле. Эту характеристику можно рассматривать как зависимость сопротивления z_p от угла φ_p . Действие реле при КЗ будет обеспечено, если характеристики срабатывания будут охватывать область, в которой может находиться вектор сопротивления z_p при КЗ на линии (площадь ОКВС на рис. 8б).

2.2.4. Схемы дистанционных защит. В современных схемах защит используются главным образом направленные реле с характеристикой в виде окружности или эллипса, проходящих через начало координат. Перспективными являются реле с характеристикой в виде четырехугольника. Ненаправленные дистанционные органы с круговой характеристикой в сочетании с органами направления мощности применяются в односистемных схемах для защиты сетей 35 кВ.

Все реле сопротивления могут неправильно работать при исчезновении напряжения. Поэтому в случае неисправности во вторичных цепях трансформаторов напряжения вводится блокировка, снимающая оперативный ток со схемы защиты. При токовых пусковых органах такая блокировка не применяется.

В *бесконтактных* (полупроводниковых) реле как измерительные органы, так и управляющая часть строятся на полупроводниках, причем управляющая часть выполняется на *логических* элементах или на базе *микропроцессорной* техники. Схемы логики содержат стандартные логические элементы ИЛИ, И, НЕ и дополнительные элементы: усилители сигналов, элементы замедления

срабатывания и возврата (осуществляющие функции реле времени), релейные элементы (реагируют на появление сигнала) и элементы памяти.

2.2.5. Уставки защиты. Выдержка времени *первой* зоны защиты А (рис. 6) определяется собственным временем срабатывания реле и составляет 0,02—0,15 с. Сопротивление этой зоны выбирается из условия, чтобы дистанционный орган ее не мог сработать за пределами защищаемой линии. Поэтому уставка принимается меньше сопротивления защищаемой линии (80—85 %), а трансформаторы тока выбираются по кривым 10%-ной погрешности при максимальном токе КЗ в конце линии. *Вторая* зона должна не только охватывать защищаемую линию, но и выходить за ее пределы. Выдержка времени колеблется в пределах 0,3—0,6 с. При выбранном ее значении протяженность зоны не должна выходить за пределы зон быстродействующих защит линий и трансформаторов, питающихся от подстанции Б. *Третья* зона должна резервировать защиты присоединений, отходящих от шин подстанции Б. Уставки срабатывания этой зоны выбираются, как правило, по условию отстройки от нагрузки, а выдержка времени — по условию селективности.

Уставка реле сопротивления выбирается из условия отстройки от минимального значения рабочего сопротивления, появляющегося на зажимах реле после отключения внешнего КЗ. Это значение будет при максимальном токе нагрузки в фазе и пониженном уровне рабочего напряжения, обычно принимаемого на 5—10 % меньше номинального. Пересчет полученных первичных сопротивлений на вторичную сторону производят по формуле $z_{cp} = z_{сз} \frac{n_m}{n_n}$. Подставляя вместо сопротивления на зажимах реле $z_{сз}$

значения z_I, z_{II}, z_{III} , находят значения вторичных сопротивлений срабатывания в данной зоне.

Все реле сопротивления должны работать в таком диапазоне токов КЗ, чтобы погрешность реле не превышала 10 %.

2.3. Дифференциальные защиты (ДЗ)

2.3.1. Способы выполнения ДЗ. *Дифференциальными* называются защиты, непосредственно сравнивающие электрические величины по концам защищаемого элемента (*продольные* защиты) или в цепях одного элемента или подстанции (*поперечные* защиты). Эти защиты обладают *абсолютной* селективностью, т. е. принципиально могут срабатывать только при КЗ на защищаемом элементе, и выполняются без выдержки времени.

В продольных защитах обычно сравниваются мгновенные значения токов, модули и фазы или только фазы токов. В поперечных защитах сравниваются мгновенные значения токов, их фазы или модули, а также мощности. Для продольных защит применяются проводные, ВЧ- и радиоканалы, для поперечных — проводные (вспомогательные провода). ДЗ используются в сочетании с другими, например резервными, защитами, имеющими *относительную* селективность, т. е. срабатывающими при внешних КЗ на смежных элементах.

2.3.2. Принцип действия продольных ДЗ. Продольная ДЗ рассматривается ниже в исполнении ее с проводным каналом. На обоих концах защищаемой

зоны устанавливаются трансформаторы тока TA_A и TA_B с одинаковыми коэффициентами трансформации, вторичные обмотки которых соединяются либо последовательно (рис. 9), либо параллельно (рис. 10). При последовательном

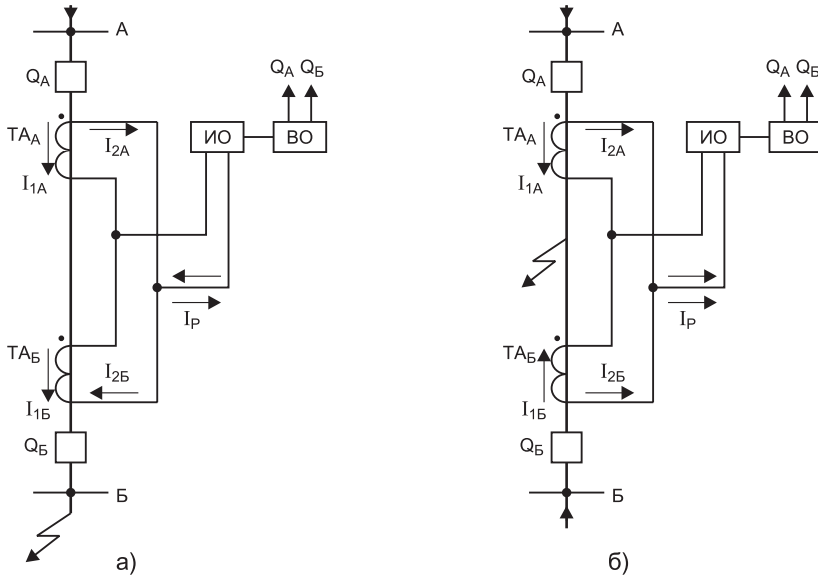


Рис. 9. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты с циркулирующими токами: а — токораспределение при КЗ вне зоны действия; б — то же при КЗ в зоне действия защиты

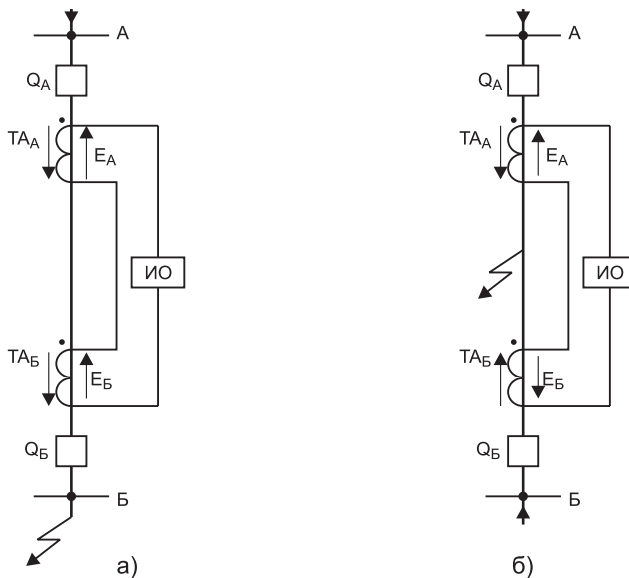


Рис. 10. Принципиальная схема продольной дифференциальной защиты с уравновешенными напряжениями: а — полярность ЭДС вторичных обмоток ТА при внешнем КЗ; б — то же при КЗ в зоне действия защиты

соединении обмоток ТА измерительный орган (ИО) реле подключается параллельно соединительным проводам, при параллельном соединении — в расщелку одного из проводов. Наиболее распространена схема первого типа.

В такой схеме при нормальном режиме работы, а также при *внешнем*, или *сквозном* КЗ, т. е. *за пределами* защищаемой зоны (рис. 9а), вторичные токи ТА циркулируют по соединительным проводам, а через ИО протекает лишь небольшой ток небаланса I_p , равный их разности, отчего данную схему называют *схемой с циркулирующими токами*. Если предположить, что трансформаторы тока не имеют погрешностей, вторичные токи I_{2A} и I_{2B} будут равны по значению и противоположны по направлению (сдвинуты по фазе на 180°), а их разность равна нулю, и реле не сработает. В действительности значение тока небаланса зависит от полной погрешности трансформаторов тока, от первичного тока I_1 и от момента КЗ, достигая наибольшего значения в первые периоды КЗ. Так как реле должно быть отстроено от максимального значения тока небаланса, чувствительность защиты получается сравнительно малой.

Для повышения чувствительности используют ТА, не насыщающиеся при протекании максимально возможного тока КЗ, преимущественно с сердечниками типа Д. Применяют также промежуточные быстро насыщающиеся (БНТ) или насыщающиеся (НТТ) трансформаторы тока, которые включаются между цепью ТА и входом ИО. Аперiodическая слагающая тока небаланса, протекающего в первичной обмотке БНТ, вызывает быстрое и сильное насыщение его сердечника, что препятствует трансформации тока во вторичную обмотку. По мере затухания аперiodической слагающей периодическая составляющая тока небаланса начинает трансформироваться, но ее наибольшее значение получается существенно меньше, чем при отсутствии БНТ, а это, в свою очередь, позволяет принимать меньшую уставку защиты и повысить тем самым ее чувствительность.

При КЗ в зоне действия ДЗ (рис. 9б) в случае двустороннего питания направление первичного I_{1B} и вторичного I_{2B} токов меняется на обратное (на угол 180°) и на вход ИО поступает сумма вторичных токов: $I_p = I_{2A} + I_{2B}$; реле срабатывает и воздействующий орган ВО подает команду на отключение выключателей Q_1 и Q_2 . При одностороннем питании в ИО проходит один из вторичных токов, и защита также срабатывает на отключение поврежденного участка; этот режим является расчетным при оценке чувствительности ДЗ. Если применяется БНТ, то через первичную обмотку его будет протекать не ток небаланса, а гораздо больший трансформированный ток КЗ. Значение периодической составляющей его при этом достаточно велико, и защита надежно сработает уже через 1—1,5 периода после начала КЗ.

В схеме второго типа (рис. 10), называемой *схемой с уравновешенными напряжениями*, при нормальной нагрузке и внешнем КЗ вторичные ЭДС трансформаторов тока направлены встречно (рис. 10а), ЭДС небаланса недостаточна для срабатывания ИО. При КЗ в зоне защиты (рис. 10б) вторичные ЭДС E_A и E_B суммируются и вызывают ток I_p , под действием которого реле срабатывает.

2.3.3. Чувствительность защиты. Поведение ДЗ при внутренних КЗ характеризуется коэффициентом чувствительности — отношением минимального

тока КЗ в защищаемой сети к току, при котором срабатывает реле защиты. Согласно ПУЭ этот коэффициент должен быть не менее 2. В большинстве случаев чувствительность защиты, выполненной по элементарным схемам рис. 9 и 10, оказывается недостаточной, а неточность определения максимального тока небаланса затрудняет отстройку защиты от внешних КЗ. Среди ряда возможных способов повышения чувствительности и отстроенности защиты наиболее широкое распространение получило использование аperiodической составляющей в токе небаланса, преимущественно путем введения в схему промежуточных трансформаторов тока (БНТ, НТТ или ТАЛТ).

Другим распространенным способом является применение специальных органов защиты с *торможением* (загрублением), ток срабатывания которых возрастает с увеличением тока внешнего КЗ или качаний. Это достигается механическим или магнитным торможением реле за счет тока повреждения. Поведение защиты в этом случае оценивается коэффициентом торможения, представляющим собой отношение тока срабатывания реле к току в тормозной обмотке: $k_T = I_{ср}/I_T$. Вместе с тем при аварии в зоне действия защиты ток срабатывания такого реле оказывается меньше, а чувствительность защиты, соответственно, выше, чем у реле без торможения. Рабочая обмотка реле включается дифференциально, тормозная — в рассечку соединительного провода. Пример включения электромеханического реле с торможением показан на рис. 11.

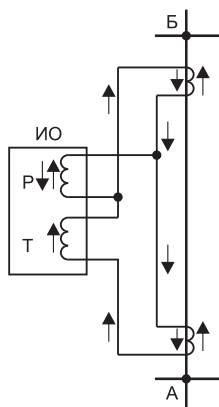


Рис. 11. Включение электромеханического реле с торможением

При внешнем КЗ в рабочей обмотке Р появляется ток небаланса, а в тормозной Т-вторичный ток КЗ, под влиянием которого реле загрубляется и не действует. При КЗ в зоне защиты ток КЗ проходит в обеих обмотках, число витков которых подбирается так, что в этом случае реле срабатывает.

Магнитное торможение осуществляется дополнительным подмагничиванием промежуточного насыщающегося трансформатора ТАЛТ током повреждения. Типовой ТАЛТ имеет обычно три обмотки: рабочую первичную, рабочую вторичную, питающую максимальный орган тока, и тормозную. Рабочая первичная обмотка включается на сумму токов ТА, тормозная — на ток одного из плеч защиты. Тормозная система под воздействием тока плеча насыщает магнитопровод, за счет чего ухудшается магнитная связь между первичной и

вторичной обмотками рабочей системы. Поэтому ток срабатывания защиты увеличивается, хотя ток срабатывания ИО (органа тока) остается неизменным. При наличии апериодической составляющей тока рассматриваемые ТАЛТ глубоко насыщаются, благодаря чему они могут одновременно использоваться как для магнитного торможения, так и для отстройки от токов небаланса. В этом заключается преимущество магнитного торможения по сравнению с обычным.

2.3.4. Практическое выполнение схем продольной ДЗ. Во всех схемах рис. 9—11 имеется в виду трех- или двухфазное (для сетей 35 кВ и ниже) исполнение защит, требующее применения шести (или четырех) дифференциальных реле и не менее четырех соединительных проводов. В таком исполнении схемы с циркулирующими токами могут применяться только для линий малой длины, не превосходящей нескольких сот метров (при ТА с вторичным током 5 А). Если для линий большей длины использовать соединительные провода приемлемых сечений (до 6 кв. мм), то нагрузка ТА, а следовательно, и токи небаланса получатся очень большими, а чувствительность очень низкой.

С целью сокращения числа жил (до двух) и сечений соединительных проводов, повышения чувствительности и упрощения защиты она выполняется односистемной, причем реле защиты включаются через фильтры симметричных составляющих тока прямой I_1 , обратной I_2 или нулевой последовательности. Преимущественное применение находят комбинированные фильтры, основанные на сравнении двух параметров: I_1 и kI_2 . Составляющая прямой последовательности имеется при всех видах КЗ; составляющая kI_2 возникает при несимметричных повреждениях (двухфазных и однофазных) и позволяет повысить чувствительность защиты, увеличивая ток в реле. Коэффициент k выбирают в пределах до 8—10, что обеспечивает преобладающее значение обратной составляющей.

В схеме предусматриваются также разделительные (изолирующие) трансформаторы, с помощью которых соединительный кабель отделяется от цепей реле. Такое разделение исключает появление в цепях реле высоких напряжений, наводимых в жилах кабеля.

2.3.5. Контроль исправности соединительных проводов. Повреждение соединительных проводов может вызвать отказ или ложное срабатывание дифференциальной защиты. При обрыве соединительного провода весь ток, поступающий от ТА, замыкается через рабочие обмотки реле. Ток в тормозной и рабочей обмотках становится одинаковым, из-за чего реле может сработать при нормальной нагрузке или сквозном КЗ. При замыкании между соединительными проводами шунтируются рабочие обмотки реле, следствием чего может стать отказ реле в случае КЗ в зоне защиты. Замыкание провода на землю не нарушает токораспределения и непосредственной опасности не представляет, но наведенные ЭДС могут вызвать ложную работу защиты в режиме нагрузки или внешнего КЗ. Поэтому ДЗ снабжается устройством, контролирующим исправность соединительных проводов. Такое устройство может выводить защиту, разрывая ее цепь отключения при повреждении проводов, или действовать на сигнал. Получило распространение устройство,

использующее наложение контрольного постоянного тока на рабочий переменный ток в проводах защиты (рис. 12).

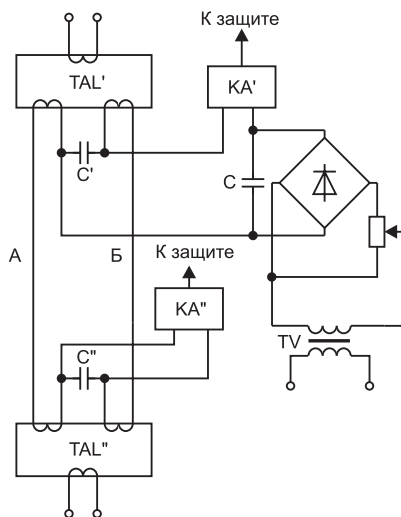


Рис. 12. Упрощенная принципиальная схема контроля исправности соединительных проводов односистемной дифференциальной защиты: TAL — изолирующие трансформаторы; C^I , C^{II} — разделительные конденсаторы; KA — минимальные реле тока контроля

К соединительным проводам А и Б подводится контрольное напряжение выпрямителя, питающегося от системы собственных нужд подстанции через трансформатор TV. Ток контроля замыкается через обмотку реле KA^I , секцию обмотки TAL^I , провод Б, секцию обмотки TAL^{II} , реле KA^{II} , секцию обмотки TAL^{II} , провод А и секцию TAL^I . Под действием этого тока якоря реле KA подтянуты.

При обрыве соединительного провода ток контроля исчезает и оба реле KA отпадают, разрывая оперативную цепь защиты и подавая сигнал о неисправности. При замыкании между проводами А и Б обмотка реле KA^{II} шунтируется, реле отпадает, выводя защиту на приемном конце линии и подавая сигнал. Обычно значение контрольного напряжения составляет 80 В, тока 5—6 мА. В случае «посадки» напряжения при КЗ на защищаемой линии реле KA удерживаются током разряда конденсатора С в течение 1—3 с.

Для сигнализации замыкания на землю предусматривается второй выпрямитель, который одним полюсом подключается к земле, другим — к соединительным проводам. При замыкании на землю одного из проводов в цепи выпрямителя возникает ток, вызывающий срабатывание сигнального реле.

Связь между комплектами защиты, расположенными на концах защищаемой линии, осуществляется многожильным бронированным кабелем, обычно телефонным. Жилы кабеля должны иметь как можно меньшее сопротивление и емкость. Первое необходимо для ограничения токов небаланса, второе — для повышения чувствительности защиты, так как емкость между жилами и на землю шунтирует рабочую обмотку дифференциального реле.

2.3.6. Продольные дифференциальные токовые защиты без соединительных проводов. В таких ДЗ информация о сравниваемых токах двух сторон участка передается по ВЧ или радиоканалу. Наиболее широкое применение нашли защиты с ВЧ каналами, для которых используются блокирующие сигналы с нормально отсутствующими токами ВЧ в канале. Эти сигналы используются на неповрежденных участках для блокирования действия защит последних.

Обычно применяется сравнение фаз токов как наиболее простое и надежное. Защиты выполняются односистемными; сравниваются токи, получаемые от комбинированных фильтров и представляющие собой векторную сумму токов прямой (I_1) и обратной (kI_2) последовательностей (так называемые *манипулирующие* токи). Для работы в сетях 110—220 кВ выпускаются различные варианты дифференциально-фазной защиты с ВЧ блокировкой, принцип действия которых заключается в следующем. Чувствительные элементы пусковых органов защиты запускают ВЧ приемопередатчики, а менее чувствительные подготавливают цепи отключения. В течение каждого положительного полупериода промышленной частоты производится передача фазы манипулирующего тока со стороны данного полукомплекта. Приемники ВЧ сигналов выполнены так, что выдают токи в органы сравнения фаз только при отсутствии принимаемых сигналов. При внешних КЗ передатчики работают в разные полупериоды, создавая в совокупности непрерывный сигнал и тем самым блокируя защиту. При внутренних КЗ сигнал имеет прерывистый характер, обеспечивающий срабатывание защиты.

2.3.7. Поперечные дифференциальные защиты. Применяются для параллельных цепей с одинаковыми или не очень различающимися параметрами, присоединяемых к шинам через отдельные или общие выключатели. Принцип действия их основан на том, что токи в этих цепях при нормальной работе и внешних КЗ близки по значению, а при КЗ на одной из цепей резко различаются. Применяются два вида поперечных ДЗ: для цепей с одним общим выключателем — *токовая*, для цепей с отдельными выключателями — *направленная* поперечная дифференциальная защита.

Токвая поперечная ДЗ предназначена для параллельных линий с общим выключателем. Схема защиты для одной фазы изображена на рис. 13. На одноименных фазах каждой линии устанавливаются трансформаторы тока с одинаковым коэффициентом трансформации. Их вторичные обмотки соединяются по схеме с циркуляцией токов. В нормальном режиме и при внешних КЗ в обмотке реле Т протекает только ток небаланса, обусловленный некоторым различием первичных токов I^I и I^{II} и погрешностью трансформаторов тока. Поскольку уставка реле Т выбирается больше тока небаланса, в этих режимах, а также при качаниях защита не работает.

В случае повреждения одной из линий, например I (рис. 13б), токораспределение изменится. Так как сопротивление линии I (от шины питающей подстанции до точки К) меньше суммарного сопротивления линии II и остальной части линии I, ток I_1 превысит ток I_{II} . Если при этом разность вторичных токов I_1 и I_2 будет равна или больше уставки реле Т, защита сработает на отключение линии. Но если КЗ произошло вблизи шин приемной под-

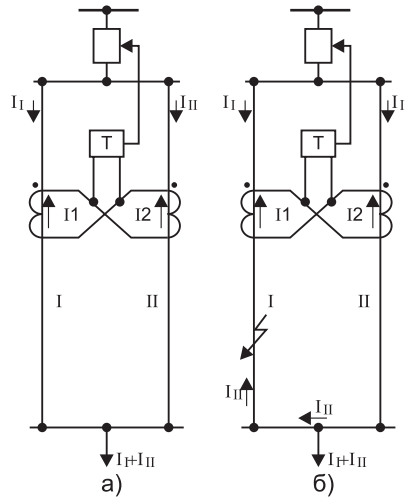


Рис. 13. Упрощенная принципиальная схема токовой поперечной дифференциальной защиты: а — режим нагрузки и внешнего КЗ; б — режим КЗ на линии I

станции, токи I_I и I_{II} будут отличаться незначительно, а их разность будет недостаточна для действия защиты.

Участок линий вблизи шин приемной подстанции, при повреждении на котором защита не работает, называется *мертвой зоной*. Для действия в этой зоне устанавливается дополнительная защита, обычно максимальная токовая. В режиме работы только одной линии токовая поперечная дифференциальная защита должна быть отключена.

Направленная поперечная дифференциальная защита предназначена для двух параллельных линий с отдельными выключателями и может выбирать и отключать только одну поврежденную линию. Защита (рис. 14) состоит из пускового органа в виде токового реле Т и органа (реле) направления мощности М двустороннего действия (иногда применяются два реле одностороннего

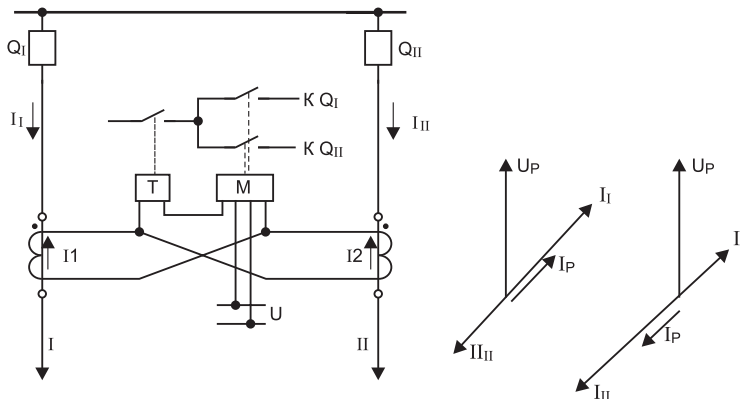


Рис. 14. Упрощенная принципиальная схема направленной поперечной дифференциальной защиты и векторные диаграммы при КЗ на линиях I и II

действия, срабатывающие при разном направлении мощности). Их токовые обмотки соединены последовательно и включены на разность токов защищаемых линий, обмотка напряжения реле М подсоединена к шинам подстанции.

Напряжение, подводимое к реле М, изменяется только по значению в зависимости от удаленности места КЗ от шин подстанции, тогда как ток, проходящий через реле мощности, изменяет также и свое направление в зависимости от того, на какой из линий произошло повреждение. Так, при повреждении на линии I ток I_I в ней будет больше тока I_{II} в линии II, а их разность будет совпадать по направлению с током I_I . В результате реле М замкнет свой верхний (по схеме рис. 14) контакт и выключатель Q_I отключит поврежденную линию I. При КЗ на линии II ток I_{II} будет больше тока I_I , их разность и ток I_p в реле изменят направление на обратное (см. векторные диаграммы рис. 14), замкнется нижний контакт реле М, и выключатель Q_{II} отключит линию II.

Направленная ДЗ правильно действует только при условии, если включены обе линии. Когда одна из них отключается, дифференциальный принцип защиты нарушается, и она превращается в направленную токовую защиту без выдержки времени, что может привести к неселективному отключению второй линии при внешних КЗ. Во избежание этого при отключении выключателя одной из линий поперечные направленные ДЗ выводят из действия путем разрыва цепи оперативного тока.

Направленная поперечная ДЗ так же, как и токовая поперечная ДЗ, имеет мертвую зону при повреждениях вблизи данной подстанции А или противоположной подстанции Б, но не отказывает, как токовая, а действует каскадно. При повреждении, например, вблизи подстанции Б на линии II в реле защиты на подстанции А будет протекать небольшой ток небаланса, пропорциональный разности первичных токов и недостаточный для срабатывания этого реле. Вместе с тем в реле комплекта защиты, установленного на подстанции Б, ток будет пропорционален сумме первичных токов и реле подействует на отключение выключателя линии II со стороны шин подстанции Б. Протекание тока КЗ по линии I прекратится, и ток в реле защиты подстанции А станет равным (точнее, пропорциональным) полному току КЗ, проходящему по линии II. Защита работает и отключит выключатель этой линии на подстанции А, благодаря чему аварийная линия будет отключена с обоих концов и КЗ на ней полностью ликвидировано. В этом случае питание подстанции Б сохранится по неповрежденной линии I.

Такое поочередное действие защиты называется *каскадным*, а зона, в пределах которой направленная дифференциальная защита не действует, пока поврежденная линия не отключится с противоположной стороны, называется *зоной каскадного действия* защиты. При каскадном действии защиты полное время отключения КЗ удваивается, что является ее недостатком. Для сокращения зоны каскадного действия следует уменьшить ток срабатывания защиты.

Другим недостатком является наличие мертвой зоны по напряжению: при близких ТКЗ остаточное напряжение, подводимое к органу направления мощности, оказывается недостаточным для его действия, и защита отказывает в работе.

2.4. Защита от замыканий на землю

2.4.1. Использование составляющих нулевой последовательности

Защита линий от КЗ на землю (однофазных и двухфазных) базируется на использовании тока и напряжения нулевой последовательности. Такой принцип осуществляется более просто и имеет ряд преимуществ по сравнению с токовой защитой, реагирующей на полные токи фаз. При КЗ на землю в каждой фазе возникают токи нулевой последовательности I_0 . В месте замыкания проходит ток КЗ, равный сумме токов нулевой последовательности всех трех фаз: $I_K = 3I_0$.

В сетях с большим током замыкания на землю токи I_0 замыкаются по контуру фаза—земля через место повреждения и заземленные нейтрали трансформаторов. Если трансформаторы с заземленной нейтралью отсутствуют, токи нулевой последовательности в таких сетях не протекают.

В сетях с малым током замыкания на землю (сети 35 кВ и ниже) токи I_0 замыкаются по контуру фаза—земля через место повреждения и общую точку емкостей фаз сети относительно земли.

А. Сети с большим током замыкания на землю.

2.4.2. Максимальная токовая защита нулевой последовательности. Защита (рис. 15) состоит из пускового реле КА и реле времени КТ. Реле КА включается на фильтр тока нулевой последовательности, для чего используется параллельное соединение трансформаторов тока. Реле КТ создает выдержку времени, требуемую по условиям селективности. Ток I_p в реле КА равен $3I_0$, поскольку сумма симметричных составляющих равна 0. Защита может работать только при одно- и двухфазных КЗ, когда имеется ток I_0 . При междуфазных КЗ (без земли), а также при симметричной нагрузке и качаниях защита не действует, так как в этих режимах сумма фазных токов равна нулю. Отстраивать защиту от токов нагрузки не требуется, что позволяет обеспечить более

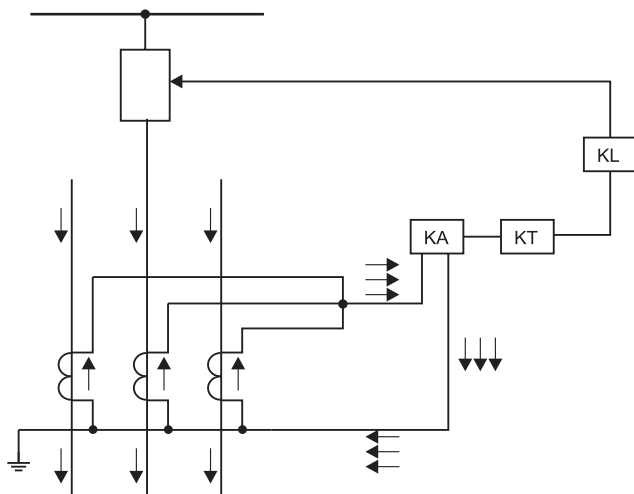


Рис. 15. Принципиальная схема защиты нулевой последовательности

высокую ее чувствительность по сравнению с защитами, реагирующими на фазные токи.

Однако равенство $I_p = 3I_0$ возможно лишь при условии полной идентичности трансформаторов тока и их цепей. В действительности даже при полном равенстве первичных токов в цепи реле КА будет протекать ток небаланса, который вычитается из тока $3I_0$, уменьшая значение тока I_p и снижая тем самым чувствительность защиты. Для ограничения тока небаланса трансформаторы тока должны: а) удовлетворять условию 10%-ной погрешности при максимальном значении тока ТКЗ; б) иметь идентичные характеристики намагничивания; в) иметь одинаковую нагрузку. Чтобы исключить ложное действие защиты, вызванное током небаланса, уставку тока пусковых реле защиты выбирают заведомо больше тока небаланса. Ток небаланса в нормальном режиме определяется измерением. У трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 А его значение составляет от 0,01 до 0,2 А, и поэтому ток срабатывания можно выбрать достаточно малым: 0,5–1 А.

2.4.3. Токковые направленные защиты нулевой последовательности. Защита содержит органы, токовые цепи которых включаются на составляющие нулевой последовательности I_0 (обычно $3I_0$), а цепи напряжения — на составляющие U_0 ($3U_0$) соответственно фазных токов и напряжений. Схема защиты приведена на рис. 16. Защита состоит из токового реле КА, реагирующего на появление КЗ на землю, реле мощности КВ, определяющего направление мощности при КЗ, и реле времени КТ, создающего выдержку времени для обеспечения селективности. Реле КА и токовая обмотка реле КВ включены на ток $3I_0$, а поляризирующая обмотка (обмотка напряжения) КВ питается от трансформатора напряжения, обмотки которого соединены по схеме разомкнутого треугольника. При таком включении реле КВ реагирует на мощность нулевой последовательности $S_0 = U_0 I_0$. Ток $3I_0$ равен току I_k замыкания на землю; напряжение $3U_0$ имеет наибольшее значение (порядка фазного) в месте КЗ.

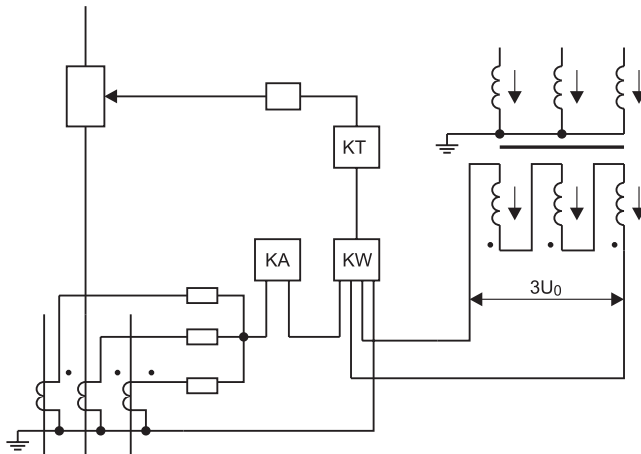


Рис. 16. Принципиальная схема токовой направленной защиты нулевой последовательности

Принято считать, что мощность нулевой последовательности направлена от места повреждения к заземленным нейтралям сети. Поскольку мощность S_0 и мощность КЗ в поврежденной фазе S_k имеют противоположные знаки, обмотки напряжения и тока реле KW должны включаться с разноименной полярностью.

В некоторых схемах поляризирующая обмотка реле мощности подключается не к трансформатору напряжения, а к специальному трансформатору тока, установленному в цепи заземления силового трансформатора. В таких схемах используются реле, имеющие две токовые обмотки (реле с токовой поляризацией).

2.4.4. Отсечки нулевой последовательности. Применяются для ускорения отключения КЗ. Принцип действия их такой же, как и у отсечек, реагирующих на фазный ток. Выполняются простыми токовыми или направленными, мгновенными или с выдержкой времени.

Токовые (ненаправленные) отсечки нулевой последовательности применяются на линиях с односторонним прохождением тока I_0 при КЗ на землю, т. е. там, где заземленные нейтрали трансформаторов расположены с одной стороны линии. *Мгновенные* отсечки отстраиваются от тока $3I_0$ при КЗ на землю на шинах противоположной подстанции. Отсечки с *выдержкой времени* отстраиваются по току и времени от мгновенной отсечки следующей линии.

Схема *направленной* отсечки нулевой последовательности с *выдержкой* времени аналогична показанной на рис. 16. Направленная защита *без выдержки* времени выполняется по той же схеме, но без реле времени.

Ток срабатывания мгновенных отсечек на параллельных линиях необходимо выбирать с учетом значительной *взамоиндукции*, которая увеличивает сопротивление нулевой последовательности соседней линии при одинаковом направлении токов I_0 в линиях, а при различном — уменьшает его. Это обстоятельство учитывается также и при выборе тока срабатывания отсечки с выдержкой времени. Токи нулевой последовательности рассчитываются для того вида КЗ на землю (однофазное или двухфазное), при котором их значение оказывается наибольшим.

Защита нулевой последовательности получила широкое распространение в сетях 110 кВ и выше. Положительными качествами ее являются простота схем, высокая надежность и чувствительность. К недостаткам относят то, что она реагирует на токи в неполнофазных режимах работы и может действовать ложно при обрыве фазного провода во вторичной цепи трансформаторов тока.

Б. Сети с малым током замыкания на землю.

2.4.5. Токи и напряжения при однофазном замыкании на землю (рис. 17). При металлическом замыкании на землю одной из фаз (рис. 17а) напряжение ее относительно земли снижается до нуля, а напряжение нейтрали становится равным по значению и обратным по знаку ЭДС этой фазы. Напряжения неповрежденных фаз повышаются до междуфазного.

В месте повреждения проходят токи, замыкающиеся через емкости фаз. Сумма этих токов равна утроенному значению нормального емкостного тока фазы.

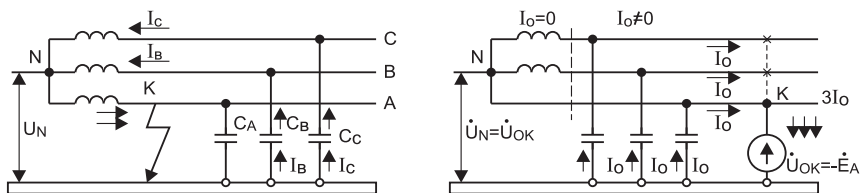


Рис. 17. Токи и напряжения при замыкании на землю:
а — замыкание фазы А; б — токи нулевой последовательности

Вследствие нарушения симметрии фазных токов и напряжений появляются их составляющие нулевой последовательности (рис. 17б). Напряжение нулевой последовательности равно и противоположно ЭДС поврежденной фазы и равно напряжению в нейтрали сети. Условно принимается, что в точке К замыкания на землю действует источник питания с ЭДС, равной $U_{OK} = U_N$. Токи I_0 , возникающие под действием напряжения U_{OK} , замыкаются через емкость фаз и заземленные нулевые точки. Ток замыкания на землю в месте повреждения равен $3I_0$.

При замыкании через переходное сопротивление на поврежденной фазе появляется напряжение. Напряжение в нулевой точке оказывается меньше, чем при металлическом КЗ. Соответственно, уменьшаются напряжения неповрежденных фаз относительно земли, а также ток I_0 . Снижение напряжения и тока нулевой последовательности учитывается коэффициентом полноты замыкания $\beta = U_{OK}/U_{\phi}$.

В кабельных сетях, а также в протяженных воздушных сетях 35 кВ емкостные токи замыкания на землю могут достигать десятков и сотен ампер. В таких сетях для улучшения условий гашения дуги и предотвращения перехода замыкания на землю в междуфазное КЗ устанавливаются дугогасящие реакторы, или катушки (ДГК), компенсирующие основную гармонику тока замыкания на землю. Такие сети называются *компенсированными*, или с компенсированной нейтралью. При замыкании на землю напряжения во всех точках такой цепи имеют те же значения, что и в сети с изолированной нулевой точкой. Ток в месте повреждения равен разности индуктивной и нулевой составляющих, а при их равенстве — нулю.

2.4.6. Принципы выполнения защиты от замыканий на землю. В компенсированных сетях и в сетях с малыми емкостными токами (до 10—20 А в сетях 10 и 6 кВ) замыкания на землю могут оставаться довольно длительное время, не вызывая повреждений и не нарушая работы потребителей. Поэтому защиту от однофазных замыканий в таких сетях выполняют с действием на сигнал, кроме сетей, где по условиям безопасности требуется немедленное отключение (карьеры, торфопредприятия и др.). Защита выполняется селективной и имеет высокую чувствительность, так как должна реагировать на малые токи повреждения: обычно 5—10 А, на торфопредприятиях — менее 0,5 А.

Простейшей защитой является общая *неселективная* сигнализация о возникновении замыкания на землю без указания поврежденного участка. Схема содержит три реле минимального напряжения, включенных на напряжение

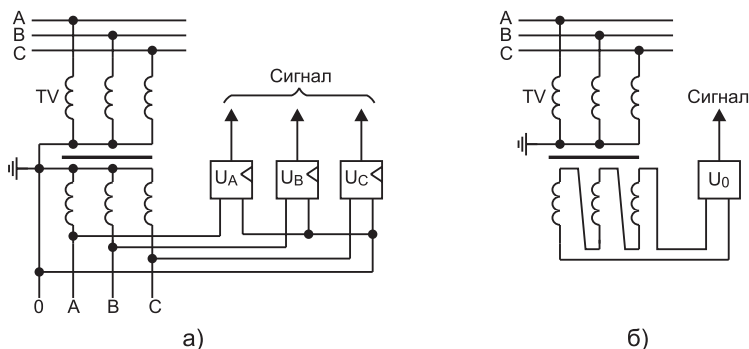


Рис. 18. Схемы неселективной сигнализации при замыканиях на землю: а — с реле минимального напряжения; б — с реле, включенным на напряжение нулевой последовательности

фаз относительно земли (рис. 18а), или одно реле, включенное на напряжение нулевой последовательности (рис. 18б).

При появлении сигнала дежурный определяет поврежденный элемент очередным отключением присоединений. Такой способ связан с отключением потребителей, требует много времени и особенно неудобен на подстанциях без обслуживающего персонала.

В качестве *селективных* защит, указывающих поврежденный участок, применяются токовые и направленные защиты, реагирующие на ток и напряжение нулевой последовательности. Для обеспечения селективной работы защиты используется различие в значении и направлении токов на поврежденном и неповрежденном участках.

В некомпенсированных сетях наиболее простым решением является применение токовых защит, реагирующих на емкостный ток сети. В компенсированных сетях для действия защиты приходится создавать ток искусственным путем, использовать токи и напряжения переходного режима или остаточные (естественные) токи, в том числе неосновных гармоник.

2.4.7. Защиты, реагирующие на искусственно созданные токи нулевой последовательности. Одним из способов искусственного создания тока является работа сети в режиме перекомпенсации, при котором ток ДГК превышает емкостный ток. Избыточный ток имеет индуктивный характер, его значение не должно превышать 25—15 А для сетей 6—10 кВ. Однако расстройка компенсации ухудшает работу сети и потому нежелательна. Другим способом является наложение тока непромышленной частоты (например, 100 или 25 Гц), подаваемого в цепь ДГК от постороннего источника.

2.4.7.1. Токовая защита, реагирующая на полный ток нулевой последовательности. Предназначена для радиальных сетей. В некомпенсированной сети она реагирует на естественный емкостный ток, а в компенсированной действует от остаточного тока перекомпенсации. Реагирующий орган защиты состоит из токового реле, питающегося через фильтр нулевой последовательности. В качестве последнего применяют либо трехтрансформаторный фильтр (см. рис. 15), либо специальный трансформатор тока нулевой последовательности.

ности (ТНП). В первом случае ток $3I_0$ получается суммированием вторичных токов, во втором — первичных. Защита с ТНП обладает значительно большей чувствительностью и является основной для сетей с малым током замыкания на землю.

Магнитопровод ТНП имеет обычно форму кольца или прямоугольника, охватывающего все три фазы защищаемой линии. Проводники фаз А, В и С служат первичной обмоткой трансформатора, вторичная обмотка располагается на магнитопроводе и питает реле тока КА (рис. 19). В режиме нагрузки, трех- и двухфазного КЗ (без замыкания на землю) сумма токов фаз близка к нулю (ток небаланса) и реле КА не действует. При замыкании на землю появляется составляющая I_0 , вызывающая срабатывание реле. Однако погрешность ТНП велика, из-за чего, в частности, нельзя вычислять вторичный ток по значению первичного тока и коэффициенту трансформации. Поэтому реле настраивают при подаче тока в первичную цепь.

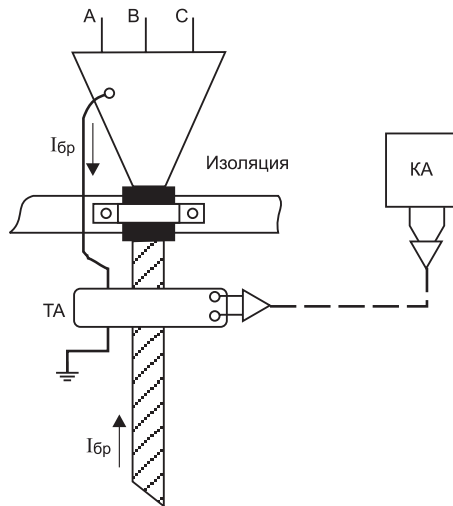


Рис. 19. Кабельный ТА нулевой последовательности (ТНП)

Через оболочку кабелей (стальную броню и свинец) могут протекать токи, которые появляются в земле при замыканиях на землю, работе сварочных аппаратов и в других случаях. Прохождение тока $I_{бр}$ по броне неповрежденного кабеля вызывает вторичный ток в обмотке ТНП, из-за чего возможно неправильное действие защиты. С целью исключения такой возможности броня и оболочка кабеля на участке от воронки до ТНП изолируются от земли. Заземляющий провод присоединяется к воронке кабеля и пропускается через окно ТНП.

При таком исполнении ток, проходящий по броне кабеля, возвращается по заземляющему проводу в обратном направлении, так что суммарный магнитный поток в сердечнике от тока $I_{бр}$ равен нулю.

Чувствительность данного вида защиты невысока. Это объясняется тем, что при замыкании на землю какой-либо линии ток замыкания проходит к шинам подстанции через емкости других присоединений, и поэтому защиту

каждой линии приходится отстраивать от бросков емкостного тока при замыканиях на других линиях, тем самым заглубляя ее. На подстанциях с малым числом линий, в компенсированных сетях с малым остаточным током емкостный ток неповрежденной линии (от которого отстраивается ее защита) бывает соизмерим с током замыкания на землю в поврежденной линии. В сетях торфоразработок применяются реле повышенной чувствительности (с усилителями) и специальные ТНП.

Для грубой оценки средних значений тока замыкания на землю (при отсутствии данных о кабелях сети и конструкции воздушных линий) можно воспользоваться следующими выражениями: $I_3 = U_{л} \times l/10$ для кабельных и $I_3 = U_{л} \times l/350$ (А) для воздушных линий, где $U_{л}$ — линейное напряжение сети, кВ; l — длина линии, км.

2.4.7.2. Наложение токов непромышленной частоты. Достаточно просто осуществляется устройство, использующее ток частотой 100 Гц. На сердечнике обычной дугогасящей катушки помещается дополнительная обмотка, цепь которой кратковременно замыкается через однополупериодный выпрямитель при появлении напряжения нулевой последовательности, т. е. при замыкании на землю. В этом случае ток, проходящий через ДГК, будет наводить в дополнительной обмотке ЭДС, а однополупериодный ток в ее цепи, в свою очередь, вызовет появление составляющей второй гармоники (100 Гц) в первичном токе ДГК. Поскольку последний замыкается через место повреждения, ток второй гармоники появляется в ТНП только заземлившейся линии, обеспечивая селективную сигнализацию. Устройство, реагирующее на ток второй гармоники, содержит токовое реле, работающее на выпрямленном токе и включенное на ТНП через фильтр токов второй гармоники.

2.4.7.3. Направленная защита. В радиальных сетях, когда собственные емкостные токи отдельных присоединений соизмеримы с полным емкостным током сети, токовая защита неприменима и целесообразно использование направленной защиты. Защита состоит из одного реле мощности, которое включается на ток и напряжение нулевой последовательности.

В *некомпенсированной* сети защита реагирует на мощность нулевой последовательности, создаваемую емкостным током линии. Поскольку направление тока, а следовательно, и мощности на поврежденной и неповрежденной линиях противоположно, направленное реле может определить поврежденную линию по знаку мощности.

В сети, работающей с *перекомпенсацией* емкостного тока, направленная защита неприменима, так как реактивный ток, протекающий в поврежденной линии, и емкостный ток в неповрежденной имеют одинаковое направление.

В *компенсированной* сети реле мощности используется в тех случаях, когда требующийся для действия защиты активный ток создается искусственным путем.

Для правильной работы направленной защиты необходима большая угловая точность измерительных трансформаторов и самого реле.

2.4.7.4. Защиты, реагирующие на остаточные токи компенсированной сети. Ток замыкания на землю содержит не только основную, но и высшие

гармоники, а также активную составляющую основной частоты, которые остаются некомпенсированными.

Активная составляющая тока замыкания обуславливается потерями в сети и дугогасящей катушке и составляет 3—5 % тока ДГК. Эта составляющая используется для работы защиты в связи с тем, что активный ток протекает только по поврежденному присоединению. Защита выполняется с помощью реле мощности косинусного типа, реагирующего на активную составляющую мощности нулевой последовательности.

Составляющие *высших гармоник* в установившемся токе замыкания на землю появляются вследствие несинусоидальности фазных токов и наличия нелинейной нагрузки (печной, тяговой и т. п.). Только за счет токов намагничивания силовых трансформаторов содержание высших гармоник достигает 5 % емкостного тока основной гармоники. Ток замыкания на поврежденном присоединении равен сумме собственных емкостных токов всех элементов сети и тока ДГР. Поэтому результирующий ток I_0 в поврежденном присоединении содержит значительно больше гармоник, чем в неповрежденных.

На этом различии основано выполнение токовой защиты, реагирующей на сумму высших гармоник тока I_0 . Защита осуществляется с помощью токового реле, включенного на ток сети через запирающий фильтр 50 Гц.

2.4.7.5. Защиты, реагирующие на токи неустановившегося режима. Различают два вида таких защит, реагирующих либо на появление токов высокой частоты, либо на полярность (знак) волн тока или соответствующей ему мощности.

Токи *высокой частоты* возникают во время переходного процесса при замыкании на землю, когда емкость заземлившейся фазы разряжается, а емкости двух других фаз заряжаются до линейного напряжения. Процесс разряда и дозаряда емкостей фаз носит характер периодических затухающих колебаний с частотой в пределах от 200 до 3000 Гц и временем затухания 0,01—0,025 с. Максимальное значение переходного тока примерно пропорционально частоте колебаний, поэтому переходные токи могут в десятки раз превосходить ток установившегося режима частотой 50 Гц. На поврежденной линии переходный ток имеет максимальное значение. Защита выполняется с помощью быстродействующих токовых реле и фильтра, пропускающего только высокочастотные составляющие.

Принцип действия защиты, реагирующей на *волновые процессы*, основан на том, что в момент замыкания на землю появляются волны тока и напряжения нулевой последовательности, распространяющиеся в обе стороны от места повреждения. Направление (или знак) тока и мгновенной мощности в поврежденном и неповрежденном присоединениях будет различным. Защита реагирует на знак волны тока или мгновенной мощности на фронте волны. В первом случае в качестве реагирующего органа применяется реле тока, во втором — импульсное реле мощности.

3. Защита отдельных видов электрооборудования

3.1. Защита трансформаторов

3.1.1. Повреждения и ненормальные режимы трансформаторов и автотрансформаторов.

Основными видами *повреждений* являются:

а) замыкания между фазами внутри кожуха трансформатора и на наружных выводах обмоток;

б) замыкания в обмотках между витками одной фазы (так называемые *витковые замыкания*);

в) замыкания на землю обмоток или их наружных выводов.

Наиболее часто возникают КЗ на выводах и витковые замыкания. При витковых замыканиях ток может быть небольшим, так как значение его пропорционально числу замкнувшихся накоротко витков. В случае замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью ток повреждения определяется емкостной проводимостью сети. Защита должна обладать высокой чувствительностью и быстродействием. Применяются токовая отсечка, дифференциальная и газовая защиты.

К *ненормальным* режимам относится появление сверхтоков, возникающих в трансформаторе при внешних КЗ, качаниях и перегрузках. При *внешнем* КЗ защита должна отключать трансформатор с минимальной выдержкой времени, необходимой для обеспечения селективности. Осуществляется при помощи максимальной токовой защиты, максимальной защиты с блокировкой минимального напряжения, токовой защиты нулевой последовательности и защиты обратной последовательности. Защиты от сверхтоков являются также резервными от повреждений в трансформаторе.

Перегрузки допускаются в течение значительного времени, в зависимости от кратности по отношению к номинальному току. Для масляных трансформаторов допускается длительная перегрузка на 5 %, если напряжение на данном ответвлении не превышает номинального. В зависимости от режима работы допускаются систематические перегрузки, значение и длительность которых регламентируются документами для конкретных групп и типов трансформаторов, а также инструкциями заводов-изготовителей.

Чаще всего возникают кратковременные самоликвидирующиеся перегрузки, при которых отключения трансформатора не требуется. Более длительные перегрузки ликвидируются дежурным персоналом или автоматически. Защита от перегрузки осуществляется с действием на сигнал или на отключение в зависимости от наличия на подстанции обслуживающего персонала.

К числу ненормальных режимов относится также *повышение напряжения*. Оно вызывает увеличение магнитной индукции, тока намагничивания и вихревых токов и, как следствие, повышенный нагрев изоляции обмоток и стали сердечника. Допускается продолжительная работа трансформаторов (с мощностью не более номинальной) при напряжении на любом ответвлении обмотки на 10 % больше номинального для данного ответвления. При этом напряжение на любой обмотке должно быть не выше наибольшего рабочего.

Для масляных трансформаторов ненормальным режимом является и *понижение уровня масла* ниже допустимого, что можно обнаружить по сигналу газового реле и указателю уровня масла. Для герметичных масляных трансформаторов ненормальным режимом является также повышение давления масла в баке.

3.1.2. Защита от свертковок при внешних КЗ. Наиболее простой является максимальная токовая защита; когда ее чувствительность оказывается недостаточной, применяются другие виды защит трансформаторов. Ниже имеются в виду только понижающие трансформаторы.

3.1.2.1. Расчеты токов КЗ. Эти расчеты производятся, как правило, проектной организацией, но в необходимых случаях подлежат проверке при наладке. Для выбора типов и уставок защиты определяют максимальное и минимальное значения токов при КЗ на выводах НН (КЗ за трансформатором).

Максимальное расчетное значение тока соответствует трехфазному металлическому КЗ за трансформатором. Оно используется для выбора уставок токовых отсечек на стороне ВН, а также аппаратуры и токопроводов на стороне НН трансформатора.

Минимальные значения токов КЗ используются при определении коэффициентов чувствительности для всех типов защит трансформатора (кроме газовой).

Наиболее просто *максимальное* значение тока ТКЗ за трансформатором вычисляется по напряжению КЗ, значение которого указывается в паспорте (паспортной табличке) трансформатора:

$$I_k = \frac{100I_n}{u_k + p},$$

где u_k — напряжение КЗ, %; I_n — номинальный ток трансформатора; p — коэффициент, %; $p = 100S_n/S_k$, где S_n — номинальная мощность трансформатора; S_k — мощность ТКЗ питающей энергосистемы, т. е. КЗ на выводах ВН трансформатора; если мощность энергосистемы сравнительно велика («бесконечна»), то $p = 0$.

Пусть, например, трансформатор напряжением 10/0,4 кВ, мощностью 1 МВ · А, напряжением $u_k = 5,5$ % подключен к сети в точке, где мощность $S_k = 100$ МВ · А. Тогда имеем: номинальный ток (на стороне 0,4 кВ) $I_n = 1445$ А, коэффициент $p = 1$ % и ток $I_k = 22,2$ кА; при $p = 0$ ток $I_k = 26,3$ кА.

Ток ТКЗ можно вычислить и по полному сопротивлению трансформатора z_T :

$$I_R = U_H / 1,73z_T; \quad z_T = \frac{u_K U_2^H}{100S_H}.$$

Воспользовавшись данными приведенного примера, будем иметь (на стороне 0,4 кВ): $z_T = 8,8$ мОм; $I_K = 26,3$ кА, что полностью совпадает с результатами расчета по напряжению КЗ для питающей сети бесконечной мощности.

Активное сопротивление трансформатора r_T (Ом) вычисляется по выражению:

$$r_T = P_K U_H^2 / S_H^2,$$

где P_K — потери короткого замыкания; значения P_K приводятся в каталогах, справочниках, заводской документации.

Индуктивное сопротивление трансформатора вычисляется как

$$x_T = \sqrt{z_T^2 - r_T^2}.$$

Значения соответствующего сопротивления каждой обмотки можно принять равными примерно половине вычисленного таким образом значения (см., например, табл. 11, разд. 1).

Минимальное значение тока при ТКЗ рассчитывается с учетом сопротивления питающей сети и переходного активного сопротивления в месте КЗ, наибольшее значение которого (отнесенное к стороне 0,4 кВ) принимается равным 15 мОм.

Специальные расчеты токов при *двухфазных* КЗ за трансформатором не производятся, их значения принимаются на 15 % меньше, чем значения тока ТКЗ.

Расчет токов I_K^1 однофазного КЗ за трансформаторами с глухозаземленной нейтралью на стороне 0,4 кВ производится по формуле

$$I_K^1 = \frac{U_\phi}{1/3 z_T^1},$$

где $U_\phi = 230$ В — фазное напряжение; z_T^1 — полное сопротивление трансформатора в несимметричном режиме однофазного КЗ (см. п. 1.1.2). Особо следует отметить, что значения сопротивлений трансформатора в симметричном трехфазном и однофазном (несимметричном) режимах КЗ прямой связи между собой не имеют. Как правило, ток ТКЗ превышает ток однофазного КЗ. Значения последнего зависят в основном от мощности трансформатора и схемы соединения его обмоток (табл. 1).

При отсутствии в табл. 1 данных для какого-либо типа обмотки ориентировочно можно считать, что сопротивление z_T^1 при схеме треугольник—звезда в 3—3,5 раза меньше, чем при соединении обмоток трансформатора по схеме звезда—звезда.

По минимальным значениям токов однофазного КЗ на стороне НН определяются коэффициенты чувствительности специальных токовых защит нулевой последовательности, а также максимальных токовых защит, установленных на стороне ВН.

Таблица 1. Расчетные значения сопротивления z_1^1 трансформаторов 6—10 / 0,4 кВ при однофазном КЗ на стороне 0,4 кВ

| Номинальная мощность трансформатора, кВ · А | Схема соединений | Сопротивление, мОм |
|---|----------------------------|--------------------|
| <i>Масляные трансформаторы</i> | | |
| 20 | Звезда—звезда с нулем | 1390 |
| 25 | То же | 1040 |
| 30 | » » | 900 |
| 40 | » » | 650 |
| 50 | » » | 540 |
| 63 | » » | 413 |
| 100 | » » | 260 |
| 160 | » » | 162 |
| 180 | » » | 150 |
| 250 | » » | 104 |
| 320 | » » | 85 |
| 400 | » » | 65 |
| 400 | Треугольник—звезда с нулем | 22 |
| 560 | Звезда—звезда с нулем | 48 |
| 630 | То же | 43 |
| 630 | Треугольник—звезда с нулем | 14 |
| 1000 | То же | 9 |
| 750 | Звезда—звезда с нулем | 36 |
| 1000 | То же | 27 |
| <i>Сухие трансформаторы</i> | | |
| 160 | Треугольник—звезда с нулем | 55 |
| 180 | Звезда—звезда с нулем | 150 |
| 250 | Треугольник—звезда с нулем | 35 |
| 400 | То же | 22 |
| 320 | Звезда—звезда с нулем | 35 |
| 560 | То же | 48 |
| 630 | Треугольник—звезда с нулем | 14 |
| 750 | Звезда—звезда с нулем | 36 |
| 1000 | То же | 27 |
| 1000 | Треугольник—звезда с нулем | 9 |

Примечание. При вторичном напряжении 230/133 В значения сопротивлений, указанные в таблице, следует уменьшить в три раза.

3.1.2.2. Защита плавкими предохранителями. Трансформаторы 10/0,4 кВ мощностью до 0,63 МВ · А в сельских и городских электрических сетях защищаются плавкими предохранителями, иногда — в сочетании с автоматическими выключателями на стороне 0,4 кВ. По способу гашения электрической дуги предохранители делятся на две основные группы:

1) с трубками из газогенерирующего материала (фибры, винипласта), где гашение электрической дуги обеспечивается высоким давлением выделяющихся газов (например, в предохранителях типа ПР) или продольным дутьем (ПСН);

2) с наполнителем (кварцевым песком), где дуга гасится в узком канале между крупинками кварцевого песка; такие предохранители обычно называют кварцевыми. Эти предохранители имеют ряд преимуществ: они обладают токоограничивающей способностью (ток КЗ не успевает достичь максимального значения); защищены от воздействия внешней среды; снабжены блок-контактами, срабатывающими при перегорании плавкой вставки; недороги и просты в обслуживании.

Время перегорания плавкой вставки тем меньше, чем выше кратность тока КЗ относительно ее номинального тока (зависимая времятоковая характеристика). Рекомендуется выбирать номинальные токи предохранителей (плавких вставок) следующими:

$$I_{н.п} \approx 2I_{н.т} \text{ — на стороне ВН,}$$

$$I_{н.п} \approx I_{н.т} \text{ — на стороне НН,}$$

где $I_{н.п}$ и $I_{н.т}$ — номинальный ток предохранителя или трансформатора соответственно.

Селективность между предохранителями на сторонах 10 и 0,4 кВ обеспечивается, если время плавления предохранителя 10 кВ при всех реально возможных токах КЗ оказывается больше времени плавления предохранителя 0,4 кВ с учетом коэффициента запаса (обычно 2,5—3). Проверка селективности между предохранителями на стороне 10 кВ и автоматическими выключателями на стороне 0,4 кВ производится путем сравнения времятоковых защитных характеристик этих аппаратов.

3.1.2.3. Токовая максимальная защита. В сети с глухозаземленной нейтралью защита выполняется по трехфазной схеме, с изолированной — по схеме неполной звезды. Включение одного реле на разность токов двух фаз на трансформаторах со схемой соединения обмоток звезда—треугольник не рекомендуется, так как при некоторых видах КЗ такая защита не действует. Схема неполной звезды по сравнению с трехфазной имеет меньшую чувствительность при КЗ за трансформатором с соединением обмоток звезда—треугольник. Для повышения чувствительности устанавливают третье реле в общем проводе трансформаторов тока, в котором будет проходить сумма токов поврежденных фаз.

Ток срабатывания защиты должен быть больше, чем максимально возможный ток перегрузки. Для предотвращения излишних (неселективных) срабатываний при КЗ на отходящих элементах защита выполняется либо с обрат-

нозависимой от тока выдержкой времени (с зависимой или ограниченно зависимой характеристикой), либо с независимой.

Защита с ограниченно зависимой характеристикой предпочтительна в тех случаях, когда она позволяет ускорить отключение повреждения. Выдержка времени выбирается из условий селективности на ступень (0,3—1 с) выше наибольшей выдержки времени защит присоединений, питающихся от трансформатора. Применяются электромеханические, электронные (статические) реле, а также элементы микропроцессорной техники.

3.1.2.4. Токовая защита обратной последовательности. Защита реагирует на ток обратной последовательности, возникающий при несимметричных КЗ. Содержит токовое реле, включенное через фильтр обратной последовательности, и реле времени.

Ток срабатывания защиты выбирается из условий: а) отстройки от тока небаланса фильтра и б) согласования по чувствительности с защитами присоединений. Считается, что при токе срабатывания $(0,5—0,7)I_n$ оба эти условия обеспечиваются. Таким образом, защита обратной последовательности при несимметричных КЗ оказывается более чувствительной, чем максимальная защита, для которой ток срабатывания выбирают больше I_n .

3.1.2.5. Специальная токовая защита нулевой последовательности. Защита реагирует на ток нулевой последовательности I_0 , возникающий при одно- и двухфазных замыканиях на землю и в трансформаторе. Устанавливается на вторичной стороне трансформаторов с соединением обмотки в звезду с глухозаземленной нейтралью и содержит токовое реле, включенное на ток нулевой последовательности. Ток $3I_0$ получается от фильтра нулевой последовательности или от трансформатора тока в цепи, соединяющей нейтраль защищаемого трансформатора с землей.

Селективность защиты обеспечивается реле времени. Применение реле с зависимой характеристикой не рекомендуется ввиду того, что при малых кратностях тока выдержка времени оказывается чрезмерно велика, тогда как она должна быть минимальной. Если на отходящих элементах имеется дополнительная защита нулевой последовательности без выдержки времени, то защиты нулевой последовательности на вводах трансформатора могут иметь выдержку времени 0,3—0,4 с, а в нейтрали на ступень выше, т. е. 0,6—0,7 с.

На *трехобмоточных* трансформаторах защиты нулевой последовательности выполняются направленными, чтобы обеспечить селективность.

Защита *автотрансформаторов* имеет следующие особенности: 1) по общей части обмотки автотрансформатора протекают встречно-направленные токи, и ток в заземляющем проводе может оказаться недостаточным. Поэтому защиту включают на трехтрансформаторный фильтр нулевой последовательности, устанавливаемый на стороне высшего и среднего напряжения (ВН и СН); 2) ввиду электрической связи между обмотками ВН и СН защиты нулевой последовательности на выводах этих обмоток выполняются направленными, так чтобы каждая из них действовала только при КЗ в сети «своего» напряжения; 3) наличие автотрансформаторной связи между сетями ВН и СН требует согласования выдержек времени защит нулевой последовательности этих сетей.

Как правило, эта защита выполняется двухступенчатой: первая — в виде отсечки, вторая — как резервная для следующего участка цепи.

3.1.2.6. Токовая защита с блокировкой (пуском) по напряжению. Блокировка осуществляется либо с помощью трех реле минимального напряжения, либо с реле напряжения обратной последовательности и одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение. Применяется преимущественно вторая схема как более чувствительная. В связи с тем, что при перегрузках защита не действует, можно не отстраивать токовые реле от аварийных нагрузок и получить большую, чем у простой максимальной защиты, чувствительность.

3.1.3. Защита от перегрузки. На подстанциях с дежурным персоналом защита от перегрузки трансформаторов действует на сигнал. Токовое реле устанавливается в одной фазе. Чтобы избежать появления сигналов при КЗ и кратковременных перегрузках, предусматривается реле времени.

На подстанциях без дежурного персонала защита выполняется трехступенчатой: первая ступень срабатывает при малых перегрузках с действием на сигнал, который передается на центральный пункт, вторая действует на отключение части потребителей при больших перегрузках, третья резервирует вторую и действует на отключение трансформатора.

Защита от перегрузки трехобмоточных трансформаторов и автотрансформаторов осуществляется так, чтобы она реагировала на перегрузку любой из обмоток.

3.1.4. Токовая отсечка. Это быстродействующая токовая защита с ограниченной зоной действия. В зону действия отсечки входят ошиновка, выводы и часть обмотки трансформатора со стороны, где установлена защита. В этой зоне отсечка отключает повреждения без выдержки времени.

Достоинством защиты являются простота и быстродействие; она позволяет понизить выдержки времени защиты линий, питающих шины, к которым присоединен защищаемый трансформатор.

3.1.5. Дифференциальная защита. Защита предназначена для отключения трансформатора при КЗ между фазами, на землю и при замыкании между витками одной фазы. В соответствии с принципом действия дифференциальной защиты (см. п. 2.3) трансформаторы тока устанавливаются с обеих сторон защищаемого трансформатора и соединяются по схеме с циркулирующими токами. В дифференциальной защите трансформаторов возможно возникновение больших токов небаланса по следующим причинам:

1) имеется ток намагничивания, и особенно может сказаться бросок этого тока при включении трансформатора (см. п. 9, раздела 1);

2) первичные номинальные токи сторон ВН и НН не равны между собой по значению и при всех группах соединения обмоток, кроме нулевой, различаются также и по фазе;

3) трансформаторы тока на сторонах ВН и НН, как правило, разнотипные;

4) баланс токов нарушается при регулировании напряжения.

Поэтому принимаются специальные меры по выравниванию вторичных токов как по значению, так и по фазе. Для отстройки от броска тока намагни-

чивания (б.т.н.) учитывают то обстоятельство, что этот ток быстро затухает (до 1 с), и применяют грубую, но быстродействующую защиту — так называемую дифференциальную отсечку. Используют следующие особенности формы броска тока намагничивания:

- преимущественно однополярный характер тока (с аperiodической составляющей);
- наличие бестоковых пауз длительностью около 7—10 с;
- наличие переменной составляющей промышленной частоты (рис. 20).

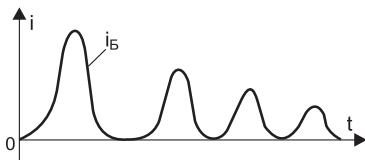


Рис. 20. Форма кривой броска тока намагничивания i_b одной из фаз при включении трансформатора под напряжение

При использовании первой особенности исполнительный орган (реле тока) включается в дифференциальную цепь защиты через промежуточный трансформатор тока, работающий с повышенной индукцией в магнитопроводе. Аperiodическая составляющая б.т.н. вызывает глубокое насыщение стали, ток во вторичную обмотку практически не трансформируется, и реле во вторичной цепи насыщенного трансформатора тока не срабатывает. Такой трансформатор называют быстронасыщающимся (БНТ) или насыщающимся (НТТ).

Если происходит КЗ в зоне действия защиты, то синусоидальный ток трансформируется и обеспечивает срабатывание исполнительного органа защиты. Хотя ток КЗ может иметь аperiodическую составляющую, насыщающую НТТ, но она быстро затухает, после чего реле срабатывает. Полное время срабатывания защиты с НТТ не превышает 0,12 с.

Вторая особенность броска тока используется, например, в работе времяимпульсного реле (защита ДЗТ-20), бесконтактной приставке УБ, представляющей собой детектор искаженной формы тока, и др.

Третья особенность использована, в частности, в реле типа РСТ-15 производства Чебоксарского завода.

Для устранения *фазового сдвига* между вторичными токами защиты принято вторичные обмотки ТА на стороне ВН соединять по той же схеме, что и обмотка НН, а вторичные обмотки ТА на стороне НН — по схеме соединения обмотки ВН защищаемого трансформатора.

Устранение неравенства *абсолютных* значений вторичных токов достигается в основном одним из двух путей:

- выравнивание *вторичных токов* с помощью промежуточных трансформаторов тока, включаемых в плечи дифференциальной защиты;
- выравниванием *магнитодвижущих сил* (МДС) в самом дифференциальном реле.

Широко применяется второй способ, для чего в типовых реле предусматриваются секционированные обмотки. Поскольку при этом может быть вы-

брано лишь целое число витков, точного равенства добиваются не всегда, и ток небаланса должен учитываться при расчете уставок защиты.

Ограничение тока небаланса, вызванного *погрешностью* трансформаторов тока. Для дифференциальных защит должна обеспечиваться полная погрешность трансформаторов тока не более 10 % при максимальном значении тока внешнего КЗ. Снижения погрешности ТА можно достигнуть путем уменьшения сопротивления вторичной нагрузки или последовательного включения двух трансформаторов тока. Однако полностью устранить ток небаланса, вызванный этой погрешностью, невозможно, и он должен учитываться при выборе уставок защиты.

Отстройка от тока небаланса осуществляется в основном двумя способами:

- 1) выбором тока срабатывания большим, чем максимальное расчетное значение тока небаланса;
- 2) торможением (заглублением) дифференциальной защиты вторичным током внешнего КЗ.

Применение микроэлектронной элементной базы дало возможность повысить чувствительность и упростить традиционные схемы защиты с дифференциальными реле. В отечественном устройстве ЯРЭ-2201 для блокировки дифференциальной защиты при б.т.н. используется составляющая промышленной частоты напряжения, пропорционального производной выпрямленного дифференциального тока. Сущность метода заключается в следующем. При б.т.н. форма дифференциального тока резко отличается от синусоидальной: из-за наличия аperiodической составляющей и (или) четных гармоник положительный и отрицательный полупериоды оказываются неодинаковыми (рис. 21а), и в выпрямленном токе появляется составляющая промышленной частоты с периодом T (рис. 21б). Это и позволяет отличить режим б.т.н. от КЗ: в режиме КЗ основная гармоника выпрямленного синусоидального тока имеет двойную частоту с периодом $T/2$, а составляющая промышленной частоты отсутствует. Производная выпрямленного тока используется потому, что дифференцирование позволяет ослабить аperiodическую составляющую и подчеркнуть основную.

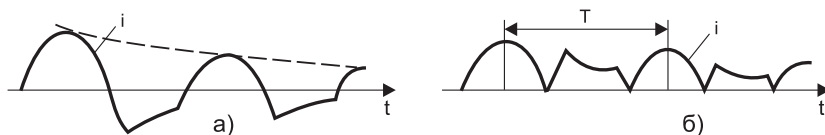


Рис. 21. Формы кривой дифференциального тока: а — дифференциальный ток i , содержащий аperiodическую составляющую (пунктир) и четные гармоники; б — тот же ток i после выпрямления; T — период основной гармоники тока i

За рубежом наибольшее распространение получили защиты с торможением или блокировкой от четных гармоник дифференциального тока.

Наилучшие результаты достигаются применением цифровой микропроцессорной техники.

3.1.6. Газовая защита. Устанавливается на трансформаторах (автотрансформаторах, масляных реакторах) с масляным охлаждением, снабженных расши-

рителями. Действие ее основано на том, что всякие, даже незначительные, повреждения, а также повышенный нагрев внутри бака трансформатора вызывают разложение масла и органической изоляции и, как следствие, выделение летучих газов почти в самом начале возникновения повреждения. Будучи легче масла, газы поднимаются в расширитель 2 (рис. 22), который сообщается с атмосферой. При значительных повреждениях бурно расширяющиеся газы приводят в движение масло, которое также перемещается в сторону расширителя. Газовое реле 1 реагирует на эти явления так, что при медленном газообразовании (например, при перегреве, витковом замыкании) подается предупредительный сигнал, а при бурном (в случае КЗ) производится отключение трансформатора. Кроме того, газовая защита действует на сигнал и на отключение или только на сигнал при опасном понижении уровня масла в баке.

С этой целью в корпусе реле обычно устанавливаются два элемента — отключающий и сигнальный, у каждого из которых имеется свой *ртутный контакт* («свинка», рис. 23). Сигнальный элемент располагается в верхней части корпуса реле, и его контакт разомкнут, если реле заполнено маслом. При выделении воздуха или при слабом газообразовании газы, поднимающиеся к расширителю, вытесняют масло из верхней части реле, уровень масла понижается и сигнальный контакт замыкается. Отключающий элемент располагается в нижней части реле, против входного отверстия маслопровода, и реагирует на скорость движения масла в последнем. При медленном газообразовании отключающий элемент не действует, так как газ заполняет только верхнюю часть реле, после чего начинает проходить в расширитель.

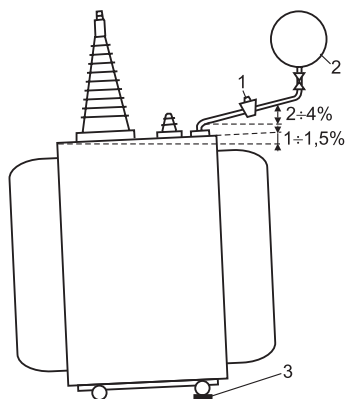


Рис. 22. Установка газового реле на трансформаторе:
1 — газовое реле; 2 — расширитель; 3 — подкладка для создания уклона

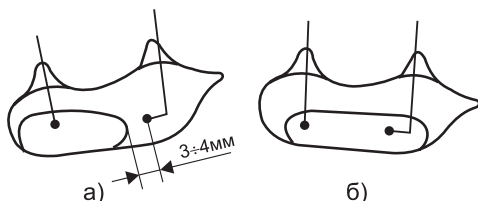


Рис. 23. Ртутный контакт:
а — разомкнут; б — замкнут

По конструкции различают реле поплавковые, лопастные и чашечные. У *поплавковых* реле внутри кожуха укреплены два поплавка в виде полых металлических цилиндров. На торце каждого поплавка расположен ртутный контакт, представляющий собой стеклянную колбочку с впаянными в нее контактами и небольшим количеством ртути внутри, которая при определенном положении колбочки переключает контакты. Один поплавок находится в верхней части кожуха реле, другой — на уровне соединительной трубы к расширителю. Контакты верхнего поплавка действуют на сигнал, нижнего — на отключение трансформатора.

Отечественная промышленность выпускала ранее поплавковые реле типов ПГ-22, РГ-2А, РГЗ-22, ПГЗ-61 и др. Чувствительность некоторых из них можно регулировать специальными грузиками. Сигнальный поплавок настраивается на срабатывание при заданном объеме газа, скопившегося в верхней части реле, обычно 300—500 мл. Отключающий поплавок должен срабатывать при скорости потока масла не менее 0,5—0,6 м/с.

Сигнальный элемент *лопастного* реле выполнен в виде поплавка, нижний отключающий — в виде поворотной лопасти (пластины) или поплавка и лопасти. Под воздействием потока жидкости или газов лопасть поворачивается, вызывая срабатывание связанных с ней контактов. Изменяя начальный угол наклона реле, можно регулировать чувствительность реле.

Сигнальный и отключающий элементы *чашечных* реле представляют собой открытые плоскодонные алюминиевые чашки, которые закреплены на оси и могут поворачиваться вокруг нее. С корпусом каждой чашки связан подвижный контакт, замыкающийся с неподвижным при опускании чашки. При понижении уровня масла срабатывает верхний, сигнальный элемент, при более глубоком понижении (например, при утечке масла из бака) — также и нижний, отключающий элемент. При бурном газообразовании отключающий элемент срабатывает с помощью закрепленной на нем лопасти.

Чашечные реле лишены существенного недостатка поплавковой конструкции, которой свойственна возможность ложного действия при нарушении герметичности поплавков, и меньше реагируют на вибрацию, чем реле с ртутными контактами. Они имеют удобную регулировку чувствительности и высокое быстродействие. Так, чувствительность нижнего элемента реле типа РГЧЗ-66 регулируется в пределах от 0,6 до 1,2 м/с, время действия при работе лопасти от 0,5 до 0,05 с в зависимости от скорости движения масла.

Надежной работе газовой защиты способствует правильное выполнение монтажа трансформатора и газового реле. Крышка трансформатора должна иметь подъем в сторону расширителя на 1—1,5 %, а маслопровод — на 2—4 % (см. рис. 22). Крышка газового реле должна быть строго горизонтальна. При пуске и останове масляных насосов и вентиляторов не должны возникать толчки и вибрации, вызывающие срабатывание газового реле. Трансформаторы рекомендуется оборудовать стационарными лестницами и площадками, установленными с одной стороны от токоведущих частей на безопасном расстоянии от них.

Провода и контрольные кабели, присоединяемые к газовому реле, должны иметь маслостойкую изоляцию или защиту от попадания масла из трансформатора, так как оно разъедает резиновую оболочку жил кабеля. Воронки уста-

навливаются несколько выше газового реле. Жилы, выведенные из воронки, должны подсоединяться к нему с изгибом вниз (для стока воды или масла). Для защиты от механических повреждений кабели рекомендуется прокладывать в трубах, которые позволяют осуществить также и защиту от влаги, или закрывать угловым железом. В газовом реле с ртутными контактами обычно применяются колбочки с контактами, впаянными сверху. При этом постоянный оперативный ток должен подводиться «плюсом» к контакту, погруженному в ртуть. В конструкциях, где контакты впаяны в торец колбочки, полярность подводимого к ним тока может быть произвольной.

При включении нового или отремонтированного трансформатора возникает опасность скопления в газовом реле воздуха, выделившегося из свежего трансформаторного масла. Во избежание ложного срабатывания газовой защиты в первое время после включения (до 3 сут) следует обеспечить контроль за объемом скопившегося воздуха и своевременный выпуск его из газового реле.

3.1.7. Особенности защиты трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения. Одно- и двухтрансформаторные подстанции часто подключаются к сети без выключателей — с помощью ответвлений от линий или по блочной схеме (рис. 24).

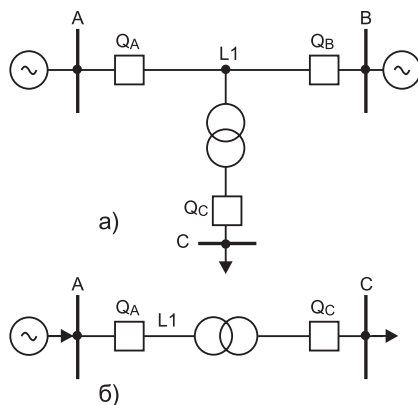


Рис. 24. Схемы подключения трансформаторов без выключателей на стороне высшего напряжения: а — от одной линии; б — по блочной схеме; А, В, С — шины подстанций; Q_A , Q_B , Q_C — выключатели на концах питающей линии L1

В обоих случаях автоматическое отключение трансформатора при его повреждении должно осуществляться выключателями на питающих концах линий. Эта операция выполняется с помощью специального канала связи или посредством короткозамыкателя, который при срабатывании защиты трансформатора устраивает искусственное КЗ. В схеме с ответвлением дополнительно применяются АПВ и отделитель.

Отсутствие выключателей на стороне ВН вынуждает использовать особые конструкции трансформаторов тока, не связанные непосредственно с выключателями. *Встроенные* ТА устанавливаются внутри кожуха на высоковольтных

вводах трансформаторов 110 кВ и выше. Накладные трансформаторы предназначены для трансформаторов 35—330 кВ, их сердечник надевается на выводы силового трансформатора снаружи.

На подстанциях без выключателей на стороне ВН обычно применяется переменный оперативный ток, так как отсутствуют электромагниты выключателей, потребляющие большую мощность.

Защита должна действовать на короткозамыкатель и отделитель так, чтобы обеспечить срабатывание отделителя в бестоковую паузу АПВ линии. Команда на его срабатывание должна поэтому подаваться после срабатывания короткозамыкателя, когда питающая линия отключилась и ток КЗ прекратился.

В схеме рис. 25 импульс на отключение отделителя подается реле времени КТ после срабатывания короткозамыкателя QN и отключения питающей линии (тока в обмотке реле КА нет). Выдержка времени реле КТ должна превосходить возможную разновременность замыкания ножа и блок-контактов короткозамыкателя (0,2 — 0,3 с). Источником питания оперативных цепей короткозамыкателя и отделителя во время бестоковой паузы на однострансформаторной подстанции служат аккумуляторы или предварительно заряженные конденсаторы. Время АПВ должно быть больше времени включения короткозамыкателя и отключения отделителя, чтобы за время бестоковой паузы поврежденный трансформатор успел отключиться. Иногда применяется и другая, несколько менее надежная схема, где отключение отделителя производится с помощью встроенного токового реле. Реле включается после появления тока КЗ, а при его исчезновении отключается, воздействуя на отключение отделителя.

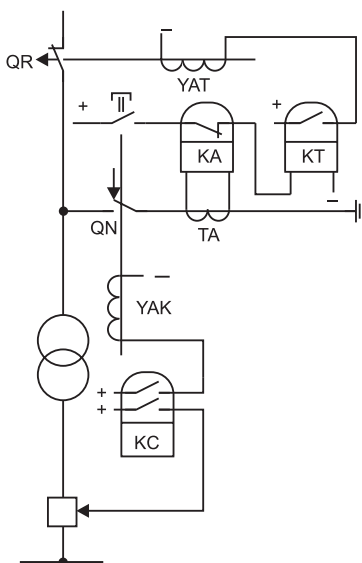


Рис. 25. Схема отключения отделителя

3.1.8. Защита вольтодобавочных регулировочных трансформаторов. Для регулирования напряжения под нагрузкой находят применение вольтодобавочные трансформаторы, первичная обмотка которых подключается к регули-

ровочному автотрансформатору, а вторичная — последовательно с вторичной обмоткой основного трансформатора. Защита вольтодобавочного трансформатора осуществляется газовым реле и максимальной токовой защитой. Кроме того, может использоваться дифференциальная защита основного трансформатора или самостоятельная дифференциальная защита вольтодобавочного трансформатора.

3.1.9. Защита блоков генератор—трансформатор и генератор—трансформатор—линия.

Наиболее часто соединяются в один блок генератор — повысительный трансформатор и трансформатор собственных нужд. На генераторах, трансформаторах и линиях блока устанавливаются те же защиты, что и в случае их раздельной работы, однако блочное исполнение имеет некоторые особенности:

1. Однотипные защиты элементов блока объединяются в одну общую защиту.
2. Упрощается защита генератора от замыканий на землю ввиду отсутствия непосредственной связи его с линией.
3. Предъявляются повышенные требования к защитам от внутренних повреждений генераторов и трансформаторов.
4. Вводится защита от перегрева ротора генератора.
5. Предусматривается действие электрических защит на остановку блока в целом.

Генераторы блока связаны сетью высшего напряжения посредством электромагнитной индукции между обмотками трансформатора и электростатической индукции через емкость между этими же обмотками, которая очень мала и составляет примерно 0,004—0,008 мкФ. При замыкании на землю в сети высшего напряжения возникающее напряжение нулевой последовательности составляет не более 1—2 % фазного, а ток нулевой последовательности — доли ампера. Напротив, у генераторов, работающих непосредственно на сборные шины, при металлических замыканиях в сети напряжение нулевой последовательности достигает фазного, а ток — нескольких ампер. При замыкании на землю в генераторе блока в месте замыкания появляется напряжение нулевой последовательности, пропорциональное числу замкнувшихся на землю витков обмотки генератора, достигая в пределе значения фазного напряжения. Ток в месте замыкания невелик и не превосходит обычно 5 А. С учетом приведенных данных широко применяется простая защита, реагирующая на появление напряжения нулевой последовательности на зажимах генератора.

При схеме генератор—трансформатор—линия выключатель на стороне высшего напряжения трансформатора обычно не устанавливается. Повреждение в трансформаторе должно отключаться выключателем со стороны генератора и выключателем на противоположном конце линии. Последняя операция производится либо с помощью короткозамыкателя, либо передачей команды по каналу связи. Защита генератора и трансформатора осуществляется как для соответствующего блока. Для защиты линии на ней со стороны системы устанавливается ступенчатая направленная токовая защита, со стороны генератора обычно используются генераторные и трансформаторные защиты от внешних КЗ.

3.2. Защита электродвигателей

3.2.1. Основные повреждения и ненормальные режимы. Наибольшую часть всех работающих электродвигателей представляют трехфазные *асинхронные* двигатели, преимущественно с короткозамкнутым ротором. Самым частым и опасным видом повреждений являются *междуфазные* короткие замыкания в обмотках статора, приводящие к значительным разрушениям обмоток и стали машины. Менее опасным, но также распространенным повреждением является *однофазное* замыкание обмотки статора на землю. Защита от замыкания на землю устанавливается в тех случаях, когда ток замыкания достигает 5 (для двигателей мощностью более 2000 кВт) или 10 А (менее 2000 кВт).

Наиболее частым ненормальным режимом является *перегрузка* током. Ориентировочно допустимое время перегрузки можно оценить по следующему выражению:

$$t = \frac{A}{k^2 - 1},$$

где t — время, с; k — кратность тока электродвигателя по отношению к номинальному; A — коэффициент, зависящий от типа и исполнения машины: можно принимать его равным 150 для открытых и 250 для закрытых крупногабаритных двигателей. Защита от перегрузки может действовать на сигнал, разгрузку приводимого механизма или на отключение электродвигателя в зависимости от условий работы и обслуживания машины.

Сверхтоки возникают также при пуске и самозапуске асинхронных двигателей, когда ток может превышать номинальный в 5–7 раз. Остановленный двигатель подобен трансформатору с большим воздушным зазором. Ток статора при номинальном напряжении велик, и только с появлением значительной противоЭДС вращения (при частоте вращения 75–90 % номинальной) уменьшается от максимального до значения, соответствующего нагрузке (рис. 26). Кроме того, аналогично трансформатору при включении двигателя под напряжение возникает бросок тока намагничивания ($I_{п.б.}$), существенно превышающий максимальное значение установившегося пускового тока ($I_{п.м.}$). Максимальная токовая защита не должна срабатывать при пуске двигателя, в частности уставка отсечки не должна превышать возможный бросок тока намагничивания.

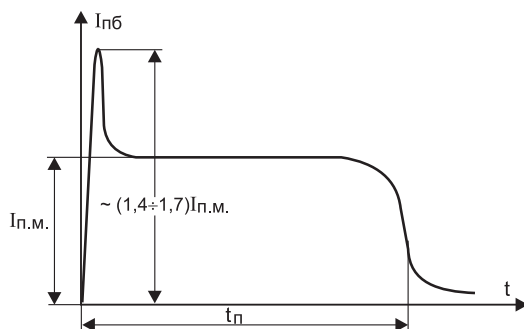


Рис. 26. Зависимость пускового тока асинхронного электродвигателя от времени

Самозапуск — это самостоятельное, без команды, восстановление нормальной работы двигателя после его остановки из-за кратковременного отключения или глубокого снижения напряжения. Наиболее часто такие провалы напряжения происходят при КЗ или автоматическом переключении питания асинхронного двигателя посредством АВР. Защита электродвигателей должна обеспечить возможность их самозапуска, т. е. не отключать их при кратковременном понижении напряжения и при его восстановлении, сопровождаемом возникновением сверхтоков.

Перегрузка возможна и при обрыве одной из фаз обмотки статора двигателя. В этом случае его нельзя запустить с места, но вращающийся двигатель может продолжать работать. Частота вращения при этом несколько понижается, а ток в обмотках неповрежденных фаз возрастает в 1,5–2 раза. Защита от *обрыва фазы* устанавливается лишь в случае, если неполнофазный режим работы может привести к повреждению двигателя.

Защита от *понижения напряжения* выполняется с помощью реле минимального напряжения и служит для облегчения условий восстановления напряжения после отключения КЗ и обеспечения самозапуска электродвигателей ответственных механизмов. Защита должна отключать неответственные двигатели как при полном исчезновении напряжения, так и при длительном КЗ в сети, вызывающем значительное падение напряжения. При исчезновении напряжения отключение может быть обеспечено посредством одного реле минимального напряжения, включенного на линейное напряжение. Такая защита надежно реагирует на понижение напряжения лишь в случае ТКЗ, а также двухфазного КЗ между теми фазами, например А и В, на линейное напряжение U_{AB} которых оно включено. При этом напряжение резко падает. Напряжения же U_{AC} и U_{BC} уменьшаются только до значения 1,5 фазного, т. е. на 15 %, что для срабатывания минимальных реле недостаточно. В необходимых случаях устанавливают три реле минимального напряжения.

Недостатком защиты является возможность ее ложного действия при обрыве цепей напряжения. Поэтому для защиты ответственных двигателей применяются схемы с двумя комплектами реле, включенными на разные трансформаторы напряжения.

Дополнительные требования предъявляются к защите блоков трансформатор—двигатель:

- повышенная чувствительность защиты от многофазных КЗ, поскольку ток КЗ уменьшается из-за внесения сопротивления трансформатора;
- необходимость отстройки защит блока от бросков тока намагничивания трансформатора при включении;
- отсутствие необходимости в защите от замыкания на землю и некоторые другие.

Наиболее важными особенностями *синхронных* двигателей с точки зрения их защиты являются следующие.

1. При асинхронном пуске двигатель потребляет из сети повышенный ток, и защиты его, так же как и у асинхронного двигателя, должны быть отстроены от токов пуска и самозапуска.

2. Момент синхронного двигателя зависит от напряжения сети, ЭДС двигателя и угла сдвига между ними, значение которого определяется нагрузкой.

Если в случае понижения напряжения сети, перегрузки или снижения возбуждения момент двигателя станет меньше момента сопротивления приводимого механизма, устойчивая работа синхронного двигателя нарушается, возникают качания, и двигатель выходит («выпадает») из синхронизма. Токи, появляющиеся в статоре, роторе и пусковой обмотке двигателя, работающего в *асинхронном* режиме, вызывают повышенный нагрев машины. Защита от асинхронного хода осуществляет ресинхронизацию двигателя или отключает его.

Ресинхронизация заключается в том, что возбуждение двигателя отключается и через некоторое время включается снова. Тогда как в синхронном режиме момент двигателя пропорционален приложенному напряжению, в асинхронном режиме он пропорционален квадрату напряжения, благодаря чему двигатель может снова втянуться в синхронизм.

3. После отключения КЗ или срабатывания АВР многие синхронные двигатели могут самозапускаться, т. е. вновь втягиваться в синхронизм под влиянием возросшего асинхронного момента. Возможность самозапуска зависит от параметров электродвигателя, его нагрузки и уровня напряжения.

Защита от *междуфазных* повреждений выполняется так же, как и для асинхронных двигателей, с тем лишь отличием, что вместе с выключателем отключается АГП (автомат гашения поля).

Защита от замыканий на землю обмотки статора применяется при токах замыкания больше 10 А с действием на отключение, как и у асинхронных двигателей.

Защита от *перегрузки* осуществляется токовым реле в одной фазе с выдержкой времени, превышающей время затухания пусковых токов. Может применяться защита с тепловыми реле, действующими на отключение. Желательно, чтобы времятоковая характеристика защиты была близка к тепловой характеристике двигателя, приведенной в документах или рассчитанной по выражению п. 3.2.1.

Защита от *асинхронного* режима реагирует на колебания тока в статоре или роторе двигателя (качания), возникающие в этом режиме (рис. 27).

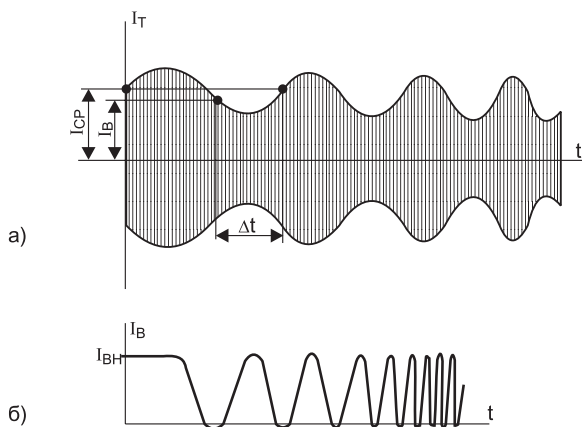


Рис. 27. Ток качаний синхронного электродвигателя при выходе из синхронизма: а — в обмотке статора; б — в обмотке ротора; I_{CT} , I_{CP} , I_B — соответственно ток статора и токи срабатывания и возврата защиты; t — время спада тока между циклами качаний

Наиболее просто защита выполняется при помощи токового реле с зависимой характеристикой, которое включается на ток статора и может одновременно использоваться для защиты от перегрузки двигателя. Действие этой защиты основано на том, что индукционное реле имеет сравнительно большое время возврата (до 0,5 с), из-за чего не успевает возвращаться после каждого толчка тока за время t и только через несколько периодов качаний срабатывает на отключение. Достаточно малое время t обеспечивается в том случае, если максимальное значение тока качаний не менее чем в 2—3 раза превышает ток срабатывания реле, т. е. в 2,5—4,5 раза — номинальный ток двигателя. В свою очередь, ток качаний зависит от возбуждения и от значения ОКЗ — отношения короткого замыкания, которое обратно пропорционально реактивному сопротивлению машины и находится в пределах 0,6—1,5. Поэтому применение защиты от асинхронного режима с индукционным реле (РТ-80) допускается только для электродвигателей, имеющих $\text{ОКЗ} \leq 1$.

Более чувствительна к асинхронному режиму токовая защита с независимой характеристикой, содержащая токовое реле мгновенного действия и выходное реле времени для отстройки от времени пуска. Здесь реле тока срабатывает с частотой тока качаний асинхронного режима, а для предотвращения сброса реле времени служит промежуточный релейный элемент с задержкой отпускания $t_{\text{отп}}$. Расчет показывает, что защита надежно подействует при скольжении, %: $s = 2/t_{\text{отп}}$, т. е. при $t_{\text{отп}} = 0,5$ с, например, $s = 4$ %. Для срабатывания достаточно, чтобы максимальный ток качаний превышал уставку токового реле защиты в 1,3—1,5 раза, так что ее можно применять для электродвигателей с любым значением ОКЗ. Желательно, чтобы защита срабатывала при возможно меньшем скольжении.

Основными недостатками защит, реагирующих на ток статора, являются недостаточное быстродействие, возможность срабатывания при допустимых перегрузках по току, недостаточная чувствительность. Более совершенной является защита, реагирующая на появление переменного тока в цепи ротора. Схема ее отличается от предыдущей тем, что токовое реле питается от трансформатора тока, введенного в цепь возбуждения. Вместо трансформатора тока может применяться дроссель. В нормальном режиме в этой цепи протекает только постоянный ток, и, так как он не трансформируется и не создает падения напряжения на индуктивности дросселя, защита не действует. При качаниях в обмотке ротора индуктируется переменный ток (см. рис. 27б) и появляется ток во вторичной цепи ТА или значительное падение напряжения на дросселе, чем обеспечивается работа защиты.

Возможно также осуществить защиту от асинхронного хода, реагирующую на изменение фазы тока статора относительно напряжения на его зажимах, например, с помощью реле направления мощности. При проворотах ротора относительно вращающегося магнитного поля реле будет срабатывать с частотой биений тока статора, а действие защиты должно наступить после отсчета заданного числа срабатываний. Последняя функция легко реализуется стандартными счетными устройствами цифровой электроники.

Защита от *понижения напряжения* является вспомогательной и выполняется так же, как и у асинхронных двигателей.

Для защиты от *обрыва цепи возбуждения* двигателя служит реле обрыва поля (РОП), действующее на отключение при исчезновении тока возбуждения у работающей машины.

Для контроля состояния изоляции цепей возбуждения устанавливается вольтметр с переключателем, позволяющий измерять напряжение полюсов относительно земли.

3.3. Защита воздушных и кабельных линий электропередачи и шин

3.3.1. Защита воздушных и кабельных линий. Линии электропередачи (ЛЭП) подвержены повреждениям в большей степени, чем другое электрооборудование. Воздушные ЛЭП повреждаются от ударов молний, от гололеда, сильного ветра, загрязнения изоляторов и пр. Кабельные линии часто повреждаются землеройными машинами, а также из-за коррозии оболочек кабеля, осадки почвы и др. Повреждения ЛЭП, находящихся под напряжением, опасны возможностью электропоражения людей и короткого замыкания фаз между собой и на землю.

В электрических сетях, работающих с заземленными нулевыми точками трансформаторов, защита должна действовать как при междуфазных, так и при однофазных КЗ, а в сетях с изолированными нейтральными — только при междуфазных КЗ. Защита от замыканий на землю в сетях с изолированными нейтральными должна действовать на сигнал.

Для защиты линий с односторонним питанием применяются: максимальная токовая защита, токовая отсечка (п. 2.1), поперечная дифференциальная защита и направленная токовая поперечная дифференциальная защита параллельных линий (п. 2.3). Кроме того, для защиты линий с двусторонним питанием применяются также: максимальная направленная защита, направленная отсечка, продольная дифференциальная защита, дистанционная защита (п. 2.2), высокочастотная защита.

Максимальная токовая защита используется преимущественно для радиальных линий с односторонним питанием. В кольцевой сети, в сети с двусторонним питанием и особенно в сложных сетях с несколькими источниками питания эта защита не может обеспечить селективность; в таких сетях применяется *максимальная направленная защита* (п. 2.1.8).

Одна из особенностей *продольной дифференциальной* защиты линии состоит в том, что для отключения ее с обеих сторон необходимо устанавливать два дифференциальных реле — на подстанциях А и Б, каждое из которых должно действовать на отключение линии со стороны «своей» подстанции выключателем Q_A или Q_B соответственно (см. рис. 9, 10). Однако при этом снижается чувствительность защиты, так как в каждом реле будет проходить только часть полного тока КЗ. Другой особенностью является повышенная нагрузка трансформаторов тока сопротивлением соединительных проводов при большой длине линий. Эти особенности, а также необходимость отстройки от токов небаланса вынуждают существенно усложнять практическое исполнение схем защиты.

Токовая поперечная дифференциальная защита предназначена для защиты параллельных линий, подсоединенных к шинам подстанции через общий выключатель и имеющих одинаковые сопротивления. На линиях с односторонним питанием защита устанавливается только со стороны источника питания, на линиях с двусторонним питанием — с обеих сторон линий. Недостатком защиты является необходимость установки дополнительной защиты от повреждений в мертвой зоне, а также на шинах противоположной подстанции. Кроме того, она не может определять, на какой из параллельных линий произошло повреждение. Поэтому для параллельных линий, присоединяемых к шинам через отдельные выключатели, применяется *направленная поперечная* дифференциальная защита.

В сетях сложной конфигурации с несколькими источниками питания максимальные и направленные защиты не могут обеспечить селективного отключения КЗ. Достичь этой цели наряду с необходимыми быстродействием и чувствительностью в сетях любой конфигурации позволяет *дистанционная* защита. В распределительных сетях напряжением выше 6 кВ дистанционные защиты линий от междуфазных КЗ используются в тех случаях, когда конфигурация сети и требования быстродействия и чувствительности не позволяют применять максимальные защиты. На линиях напряжением 35 кВ и выше дистанционные защиты выполняются трехступенчатыми, причем в первой зоне отключение осуществляется без выдержки времени. Преимущественное распространение дистанционные защиты получили в сетях 35 кВ и выше для отключения междуфазных КЗ, в том числе и при двойных замыканиях на землю в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. В сетях с глухозаземленной нейтралью дистанционные защиты дополняются ступенчатой токовой защитой нулевой последовательности.

Однофазные замыкания на землю являются наиболее распространенным видом повреждения линий. В сетях с *изолированными* или заземленными через *компенсирующие* катушки нейтралью (сети 35 кВ и ниже) ток замыкания на землю невелик и непосредственной опасности не создает. Однако повышение напряжения «здоровых» фаз относительно земли в 1,73 раза и длительное протекание даже сравнительно небольшого тока замыкания могут привести к пробое изоляции и двухфазному КЗ. Поэтому быстрого отключения не требуется (за исключением линий, питающих передвижные механизмы карьеров, торфопредприятий и т. п.), но поврежденный участок должен быть выявлен и через определенное время (до 2 ч) отключен. Отыскание места замыкания на землю производится с помощью устройств сигнализации, наиболее простым из которых является включение трех вольтметров на фазные напряжения.

В сетях с *глухозаземленными* нейтралью составляющие нулевой последовательности тока КЗ замыкаются через все заземленные точки и проходят поэтому не только по поврежденной, но и по неповрежденным линиям, что осложняет организацию защиты. Максимальная токовая защита от однофазных КЗ в большинстве случаев состоит из двух или трех ступеней. Первой ступенью является обычно мгновенная отсечка, защищающая часть линии. Второй ступенью является максимальная токовая защита с ограниченной зоной действия, третьей — максимальная токовая защита с током срабатывания, от-

строеным от тока небаланса, и выдержкой времени, выбранной по условиям селективности.

В большинстве случаев селективность обеспечивается применением направленной защиты нулевой последовательности, действующей только при КЗ на защищаемой линии и на линиях, отходящих от шин противоположной подстанции. Она выполняется обычно с несколькими ступенями выдержек времени и токов срабатывания и с общим органом направления мощности. Первой ступенью служит обычно направленная отсечка мгновенного действия, которая, в отличие от токовой отсечки, отстраивается только от тока нулевой последовательности, направленного от шин подстанции. Второй ступенью является направленная защита ограниченной чувствительности, третьей — чувствительная направленная защита, отстроенная от тока небаланса трансформаторов тока.

3.3.2. Защита шин.

3.3.2.1. Назначение и особенности защиты шин. Дифференциальная защита. На шинах могут возникать такие же замыкания, как и на линиях. Причинами их могут быть: перекрытие шинных изоляторов и вводов выключателей; повреждение трансформаторов напряжения и трансформаторов тока; поломка изоляторов разъединителей и выключателей, ошибки обслуживающего персонала и др. В общем случае КЗ на шинах могут быть отключены защитами на питающих их генераторах, трансформаторах и линиях, а также резервными защитами линий на соседних подстанциях. Однако эти защиты действуют с выдержкой времени, иногда значительной, а в ряде случаев неселективно. Для ускорения отключения повреждений и обеспечения селективности применяется специальная защита шин.

Дифференциальная защита выполняется по тому же принципу, что и дифференциальная защита трансформаторов и линий, т. е. производится сравнение значений и фаз токов, приходящих к защищаемому элементу и уходящих от него. Первичные обмотки трансформаторов тока всех присоединений подключаются к шинам одноименными зажимами, а вторичные обмотки соединяются одноименными выводами параллельно и к ним подключается дифференциальное реле (рис. 28).

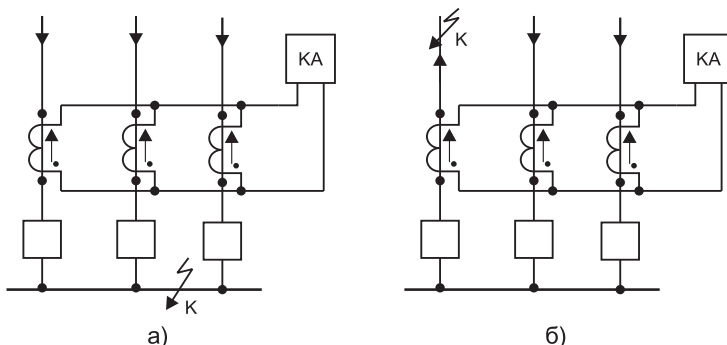


Рис. 28. Распределение токов во вторичных цепях дифференциальной защиты шин: а — при КЗ на шинах; б — при внешнем КЗ

При КЗ на шинах (рис. 28а), в зоне действия защиты по всем присоединениям ток направляется к месту повреждения (точка К), т. е. к шинам подстанции. В обмотке реле проходит сумма вторичных токов, и оно срабатывает. При внешнем КЗ вне зоны (рис. 28б) ток, идущий от шин к месту повреждения (точка К), равен сумме токов, притекающих к шинам от источников питания. Сумма токов равна нулю, и реле не действует.

Однако фактически при внешнем КЗ в реле проходит ток небаланса, обусловленный главным образом различием нагрузки на трансформаторы тока поврежденного и неповрежденных присоединений. Действительно, через каждый из трансформаторов тока неповрежденных присоединений проходит только часть тока КЗ, на поврежденном же присоединении трансформаторы тока обтекаются полным током КЗ. Разные условия намагничивания и приводят к появлению тока небаланса даже при идеальном совпадении характеристик трансформаторов тока.

Ток небаланса может вызвать ложное срабатывание защиты, поэтому принимаются меры к его ограничению путем уменьшения разности между намагнивающим током трансформаторов тока на присоединении с наибольшим током КЗ и суммой намагничивающих токов ТА на остальных присоединениях. Эта цель достигается при работе всех ТА в ненасыщенной (близкой к линейной) части характеристики намагничивания, для чего необходимо:

а) применять *однотипные* трансформаторы тока, у которых насыщение происходит при возможно большем токе (класс Д);

б) уменьшать *кратность* тока КЗ относительно номинального тока ТА, выбирая последние с возможно большим коэффициентом трансформации;

в) снизить *нагрузку* на ТА, уменьшив сопротивление и ток вторичной цепи, первое — за счет увеличения сечения и сокращения длины соединительных проводов, второй — применением ТА с номинальным вторичным током 1 А.

Общая погрешность не должна превосходить 10 %.

Лучшую отстройку от токов небаланса обеспечивают дифференциальные защиты с торможением и дифференциально-фазная защита, применяемые для шин 110 кВ и выше.

Для отстройки от повышенных токов небаланса в *неустановившемся* режиме применяют быстронасыщающиеся трансформаторы тока.

В случае неисправности вторичной цепи ТА какого-нибудь присоединения баланс токов в дифференциальном реле может нарушиться и вызвать ложное срабатывание защиты. Поэтому дифференциальное реле отстраивается от тока нагрузки наиболее загруженного присоединения. Кроме того, в нулевом проводе устанавливается чувствительное токовое реле и миллиамперметр. При обрыве или шунтировании фазы вторичной цепи это реле выводит из действия защиту, а миллиамперметр позволяет обнаружить не только обрыв, но и ухудшение контакта в цепи или витковое замыкание в ТА.

3.3.2.2. Схемы дифференциальной защиты шин.

Схема для подстанций с одной рабочей и одной резервной системами шин. Наиболее просто схема дифференциальной защиты шин выполняется в том случае, когда подстанции нормально работают на одной системе шин, в то время как вторая находится в «холодном» резерве, без напряжения. При переводе присоединений с рабочей системы шин на резервную обе системы шин

жестко связываются шиносоединительным выключателем и входят в зону действия защиты. Трансформаторы тока шиносоединительного выключателя к защите не подсоединяются, так как в нормальном режиме он отключен. При подаче напряжения на резервную систему шин для опробования она попадает в зону действия защиты. Предусматривается блокировка, которая в это время запрещает действие защит всех присоединений, кроме шиносоединительного выключателя, с тем чтобы при КЗ на шинах защита не отключила всю подстанцию. Когда шиносоединительный выключатель используется вместо ремонтируемого выключателя одного из присоединений, токовые цепи его подключаются к цепям дифференциальной защиты шин (с помощью испытательного блока). Блокировка выполняется посредством промежуточного реле с замедлением на возврат порядка 1—2 с.

Схема для подстанций с двумя рабочими системами шин. На таких подстанциях в работе нормально находятся две системы шин, связанные секционным или шиносоединительным выключателем, для каждой из которых предусматривается отдельная дифференциальная защита. При КЗ на одной системе шин сработает только ее защита и отключит все выключатели, подключенные к данной системе шин.

Существенные особенности имеет дифференциальная защита при неизменном (фиксированном) подключении каждого присоединения к определенной системе шин. В этом случае схема с двумя самостоятельными защитами не обеспечит селективности в случае внешних КЗ: а) при включении всех присоединений на одну из систем шин и б) при вынужденном нарушении фиксации присоединений. С учетом этих режимов применяется схема с тремя комплектами защиты: два индивидуальных комплекта для каждой системы шин и третий — для защиты обеих систем шин.

Схема с двумя выключателями на каждом присоединении. На подстанции с двумя системами шин каждое присоединение подключается к обоим системам шин, каждая из которых оборудуется отдельным комплектом защиты, действующей на отключение своих шин. При КЗ на шинах защита неповрежденной системы шин не действует, и от них будут получать питание все присоединения.

Недостатком дифференциальной защиты шин является то, что она не действует при качаниях и перегрузке.

Неполная дифференциальная защита шин. На подстанциях с реактированными линиями и несколькими источниками питания 6—10 кВ применяется упрощенная дифференциальная защита с помощью токовых реле, включенных на сумму токов всех источников питания. Трансформаторы тока отходящих линий к защите не подключаются, что упрощает схему и является ее преимуществом. При внешних КЗ защита не действует и может выполняться без выдержки времени, являясь по существу токовой отсечкой.

3.3.2.3. Другие виды защит. Шины подстанций 6—10 кВ с реактированными линиями потребителей могут быть защищены с помощью *токовой отсечки*, включенной на ток питающего трансформатора. Отсечка выполняется с двумя реле, включенными в две фазы, или одним реле, включенным на раз-

ность токов двух фаз. Ток срабатывания отсечки отстраивается от максимального тока при повреждении за реактором отходящих линий.

Применяется также *дистанционная защита*, которая устанавливается на трансформаторах, связывающих защищаемые шины с системой. Защита состоит из пусковых реле и реле сопротивления. Уставка срабатывания последних выбирается меньше сопротивления реакторов линии и трансформатора связи с тем, чтобы защита не работала при КЗ за реактором или трансформатором. При металлическом КЗ на защищаемых шинах напряжение и сопротивление на зажимах омметра снижаются до нуля и защита отключает трансформатор, отделяя тем самым поврежденные шины от системы.

4. Органы РЗ и их элементная база

4.1. Электромеханические реле

Электромеханические реле составляют основную долю находящихся в эксплуатации устройств РЗА. Ниже рассматриваются *вторичные* реле, у которых воспринимающий орган (обмотка) включается в цепи измерительных трансформаторов тока и напряжения.

4.1.1. Реле прямого действия. Реле встраиваются в приводы выключателей и действуют на их отключение непосредственно.

Реле *максимального тока* типа КАМ появились в довоенное время, но еще встречаются в эксплуатации. Реле содержит латунную гильзу с неподвижным полюсом, сердечник, механизм выдержки времени и катушку с отпайками. Сердечник выполнен в виде пустотелого цилиндра, внутри которого расположена пружина, а в верхней торцовой части запрессован короткозамкнутый медный виток или проложена тонкая (0,5 мм) латунная шайба для устранения прилипания сердечника к неподвижному полюсу и уменьшения вибрации. Через сердечник и неподвижный полюс проходит ударник, соединенный с механизмом выдержки времени. Выдержка времени регулируется путем изменения взаимного положения рейки и сцепленного с ней зубчатого колеса: чем больше зубьев рейки входит в зацепление, тем больше выдержка времени, и наоборот. Когда в зацеплении находится один зуб, минимальная выдержка времени составляет 0,5 с, а, так как рейка имеет восемь зубьев, максимальная выдержка времени будет 4 с. Шкалу выдержек времени можно изменить положением грузика на оси анкера: при удалении его от оси выдержка увеличивается, при приближении — уменьшается. Ток срабатывания реле регулируется путем изменения числа витков катушки, подключенных к трансформатору тока, с помощью штепсельного переключателя в пределах 5—10 А через 1 А. При необходимости верхний предел может быть повышен до 89 А путем пересоединения отпайек на катушке.

Различают следующие режимы работы реле в зависимости от кратности тока в его обмотке относительно тока срабатывания:

а) кратность не более 2—3. В этом режиме сердечник начинает двигаться вверх, причем пружина сжимается незначительно. Усилие от сердечника передается на ударник посредством пружины, так что скорость движения последнего зависит от значения тока. Через промежуток времени, определяемый значением тока и уставкой выдержки времени, последний зуб рейки соскакивает с зубчатого колеса, и движение ударника приводит к отключению выключателя. После исчезновения тока в обмотке реле сердечник вместе с ударником возвращается в исходное положение. Это — режим работы в *зависимой* части характеристики;

б) кратность более 3—4. Сердечник быстро поднимается вверх до упора и сразу сжимает пружину, которая, стремясь вернуться в исходное положение, толкает ударник вверх. Скорость его движения зависит только от упругости пружины и тормозящих усилий механизма выдержки времени. Это режим работы в *независимой* части характеристики.

Коэффициент возврата реле при работе его в зависимой части характеристики составляет 0,7—0,8, в независимой 0,9—0,95.

Реле *типа РТВ* отличается от реле КАМ конструкцией механизма выдержки времени и имеет вместо штепсельного переключателя витков переключатель поворотного типа. Характеристики у него такие же, как и у реле КАМ. Изменение выдержки времени производится перемещением установочного винта на корпусе реле, связанного с рычагом часового механизма выдержки времени. Погрешность часового механизма не превышает 0,2 с.

Основные характеристики реле РТВ (приводов ПП) приведены на рис. 29. Здесь видно, что у реле типоразмера РТВ I, II, III независимая часть характеристики начинается при кратности тока в реле (I_p) 1,2—1,7 от тока срабатывания (I_{cp}), у реле РТВ IV, V, VI — при кратности 2,5—3,5. Реле РТВ разных заводов имеют различные пределы и ступени регулирования тока срабатывания.

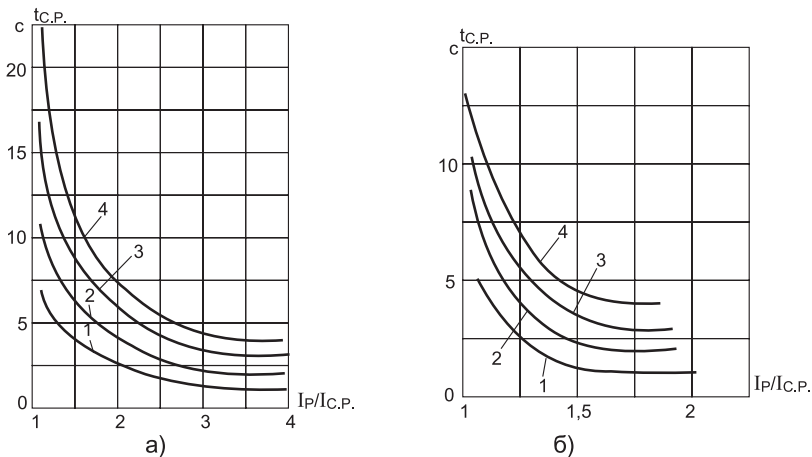


Рис. 29. Зависимость времени срабатывания t_{cp} от кратности тока I_p/I_{cp} для реле РТВ на уставках 1, 2, 3 и 4 с: а — реле РТВ IV, V, VI; б — реле РТВ I, II, III

Коэффициент возврата реле не регулируется и является величиной переменной, зависящей от кратности тока и длительности протекания тока КЗ; его определяют для момента времени, соответствующего отключению КЗ нижестоящей защитой. Так, если защита действует без выдержки времени, коэффициент возврата достигает 0,85—0,9, при времени отключения КЗ около 3 с снижается до 0,65—0,75, а если реле работает в зависимой части характеристики — примерно до 0,6.

Реле максимального тока *типа РТМ* по конструкции мало отличается от описанных, но не содержит механизма выдержки времени. Из рис. 30 видно, что практически мгновенное действие реле обеспечивается лишь при кратности тока не менее 2.

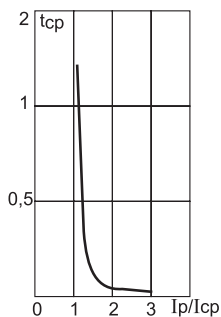


Рис. 30. Зависимость $t_{ср}$ ($I_p/I_{ср}$) для реле РТМ (привод ВМП-10П).
Обозначения те же, что на рис. 29

Реле РТМ применяются в основном в схемах токовой отсечки линий и трансформаторов как токовые реле в дифференциальной защите трансформаторов и в схемах с дешунтированием как электромагнит отключения.

Во всех случаях необходимо согласование времени срабатывания реле с выдержкой времени защит, расположенных ближе к источнику питания.

Некоторые модификации реле РТМ допускают плавную регулировку тока срабатывания изменением воздушного зазора между сердечником и неподвижным полюсом.

Реле максимального тока с выдержкой времени типа РМВ имеют независимую характеристику и предназначены для максимальных токовых защит в тех случаях, когда реле с ограниченно зависимой характеристикой неприменимы. Реле выполнено в корпусе реле типа РТВ и с использованием его часового механизма. При токе срабатывания сердечник сжимает пружины, под действием которых начинает работать часовой механизм; при токе возврата и ниже сердечник опускается вниз, возвращая часовой механизм в исходное положение. Характеристики усилий пружин и электромагнита согласованы таким образом, что на всем пути движения сердечника первая проходит ниже, благодаря чему реле имеет независимую характеристику.

Реле минимального напряжения типа РН применяется для защиты минимального напряжения без выдержки времени. Для подготовки реле к работе оно должно быть заведено специальным механизмом при включении привода. В заведенном реле катушка находится под напряжением и удерживает сердечник в верхнем положении. При исчезновении напряжения или снижении его до 65 % номинального значения и ниже сердечник падает и приводит в действие механизм отключения выключателя. При восстановлении напряжения до 65—85 % номинального сердечник вновь подтягивается вверх, но для возвращения в исходное положение реле требует дополнительной заводки.

Реле минимального напряжения с выдержкой времени типа РНВ конструктивно представляет собой сочетание реле РН с часовым механизмом от реле РТВ. Применяется для защиты минимального напряжения высоковольтных двигателей и в схемах автоматики (АВР, АПВ) для отключения или включения выключателей. Пределы изменения выдержки времени 0—5 с.

Реле типа РМНВ-1 отличается от РНВ тем, что для создания выдержки времени в нем используется часовой механизм от реле времени типа ЭВ-121, работающий под действием пружины. Завод пружины осуществляется вруч-

ную. Реле можно вывести из работы путем запираания механизма заведенного реле.

Действие реле типа РНВЛ аналогично. Напряжение срабатывания регулируется пружиной в пределах 35—65 % номинального. При снижении напряжения ниже 35 % гарантируется безотказное срабатывание реле. Напряжение возврата может быть от 65 до 85 %; при напряжении свыше 85 % гарантируется включение выключателя. Выдержка времени может регулироваться от 0,5 до 9 с. Следует иметь в виду, что завод гарантирует работу реле с заданным временем только при полном снятии напряжения «скачком»; при плавном снижении напряжения или снижении в пределах 35—65 % время работы реле неопределенно. Реле РНВЛ применяется преимущественно для отключения электродвигателей, самозапуск которых недопустим по условиям безопасности, технологии или обеспечения самозапуска других двигателей.

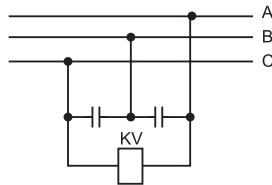


Рис. 31. Схема включения реле минимального напряжения РНВЛ и РМНВ-1 с конденсаторами

Во избежание ложного срабатывания реле при повреждении цепей трансформатора напряжения, в основном при перегорании предохранителей или обрыве, применяется трехфазная схема с конденсаторами, собранными в неполную звезду.

Принцип действия схемы заключается в том, что при обрыве одной из фаз А или С реле удерживается за счет напряжения между фазой В и «здоровой» фазой (С или А), подводимого к его обмотке через конденсатор.

Далее рассматриваются вторичные реле *косвенного* действия, воздействующие на привод выключателя посредством промежуточных элементов на постоянном или переменном оперативном токе. Обозначения устаревших типов реле отечественного производства приведены в скобках.

4.1.2. Электромагнитные реле тока и напряжения типов РТ (ЭТ) и РН (ЭН). Магнитная система реле состоит из стального сердечника с двумя обмотками и поворотного якоря. Электромагнитный момент, втягивающий якорь, пропорционален квадрату тока в обмотке и изменению магнитной проводимости в зависимости от угла поворота якоря. Максимальное значение момент имеет при определенных значениях угла, в связи с чем крайние положения якоря ограничиваются упорами, а его полный ход — небольшим углом порядка 10° . Избыточный момент, т. е. разность между электромагнитным и противодействующим механическим моментами, обеспечивает движение якоря и в конце его хода — достаточное давление на контакты. Увеличение давления ведет к снижению коэффициента возврата, так как для компенсации избыточного момента требуется большее снижение тока в обмотке реле. Наоборот, чем меньше избыточный момент, тем выше коэффициент возврата.

Динамические усилия, которым подвергается реле при токах КЗ, пропорциональны квадрату тока в обмотке или, иначе, квадрату отношения тока в обмотке к току срабатывания. По соображениям динамической устойчивости, а также потому, что абсолютное значение усилия в начале шкалы весьма мало, нежелательно выбирать уставки в начальной части шкалы. Рекомендуется, чтобы рабочие уставки токовых реле располагались не ниже $\frac{1}{3}$ шкалы, реле минимального напряжения — не ниже $\frac{1}{2}$ шкалы, так как эти реле постоянно находятся под номинальным напряжением и в большей степени подвержены износу от вибрации.

Электромагнитная сила, действующая на якорь, всегда направлена в сторону притяжения его к сердечнику, независимо от направления тока в обмотке. Поэтому электромагнитный момент пульсирует, изменяясь от нуля до максимума два раза в течение одного периода, т. е. 100 раз в секунду при частоте тока в обмотке 50 Гц. Эти колебания и являются причиной *вибрации* подвижной системы реле, которая может возникнуть при любых значениях тока (напряжения), превышающих уставку срабатывания. Для предотвращения или снижения такого эффекта применяют механические демпферы или выпрямители переменного тока, которые при значительной индуктивности обмотки реле позволяют питать ее выпрямленным током со сглаженными пульсациями. Вибрации могут возникнуть и при работе на несинусоидальном токе, в частности в случае насыщения тонкого стального якоря при большой кратности тока в обмотке реле по отношению к току срабатывания (порядка 10 и более по отношению к начальной уставке по шкале) или из-за искажения формы кривой вторичного тока трансформатора тока. В этих случаях применяют реле специального исполнения, меньше подверженные вибрации.

Кроме вибрации подвижной системы, обусловленной характером электромагнитного момента, наблюдается еще вибрация собственно контактов, имеющая механическое происхождение: в момент касания подвижного и неподвижного контактов возникает отскок контакта. Надежность работы контактов реле защит определяется четким однократным срабатыванием и возвратом промежуточного реле или реле времени, на которое действуют эти контакты. При вибрации возможно подгорание контактов и сбой в работе всей схемы защиты. Вибрация реле не допускается, независимо от ее происхождения.

Уставки срабатывания реле можно изменять вдвое за счет последовательного или параллельного соединения обмоток путем перестановки перемычек на его зажимах. Цифры, нанесенные на шкале, соответствуют последовательному соединению. Уставки основных типов реле серии ЭТ520 можно регулировать в пределах 0,05—200 А, серии ЭН520 и ЭН60 — в пределах 15—400 В.

Разрывная мощность контактов для реле ЭТ и ЭН при напряжении 220 В и токе 2 А составляет 50 Вт на постоянном и 250 В · А на переменном токе. Собственное время срабатывания максимальных реле от момента включения обмотки до замыкания контактов не превосходит 0,15 с для реле ЭТ и ЭН и 0,10 с для реле РТ и РН при токе (напряжении) 120 % уставки, а для минимальных реле ЭН500 и РН — не более 0,15 с при снижении напряжения до 80 % уставки. Потребляемая мощность реле ЭН и РН на минимальной уставке по шкале составляет 1 В · А, кроме реле РН53/60Д — до 5 В · А. Уставки

тока срабатывания реле РТ40 можно изменять в пределах 0,15—200 А, напряжение срабатывания реле серий РН53 и РН54 — в пределах 15—400 В.

4.1.3. Электромагнитные токовые реле РТ40/Ф, РТ40/Р, РТ40/1. Обмотки реле получают питание через промежуточные трансформаторы, два последних типа — с выпрямителем. Грубое изменение уставок производится переключением отпаяк на первичной стороне трансформатора, плавное — поводом реле.

Реле тока *мгновенного действия фильтровое* РТ40/Ф обеспечивает загробление защиты при возникновении высших гармоник тока, в частности, в схемах поперечной дифференциальной защиты генераторов. Отклонение формы кривой переменного тока от синусоиды может происходить по следующим причинам: а) искажение формы кривой ЭДС генераторов; б) наличие в цепях нелинейных элементов, т. е. таких, сопротивление которых зависит от значений приложенного напряжения или тока; наличие регулируемых вентильных преобразователей. Для отстройки реле от токов высших гармоник параллельно обмоткам реле подключены конденсаторы, емкость которых выбрана так, чтобы через них протекала большая часть токов высших гармоник. Так, при частоте третьей гармоники токи срабатывания реле возрастают примерно в 8 раз.

Реле имеет 4 диапазона уставок от 1,75 до 17,6 А. Коэффициент возврата на любой уставке не менее 0,8. Мощность, потребляемая реле на минимальной уставке каждого диапазона, не превышает 1 В · А. Изоляция между обмотками выдерживает испытательное напряжение 500 В переменного тока.

Реле РТ40/Р применяется в схемах устройств резервирования отказа выключателей (УРОВ) для выявления фаз выключателя, не отключившихся при КЗ от релейной защиты. Реле применяется и в других схемах РЗиА, где требуется контроль наличия или отсутствия тока. С этой целью промежуточный трансформатор выполнен в виде насыщающегося трансформатора тока с тремя первичными обмотками, которые подключаются к трансформаторам тока фаз сети, и одной вторичной, питающей обмотку исполнительного органа — реле РТ40. Количество витков первичных обмоток выбрано таким образом, что их суммарная МДС оказывается достаточной для срабатывания реле при различных случаях отказа выключателей и видах КЗ. Реле выпускаются на номинальные токи 1 и 5 А. Пределы токов срабатывания от 0,13 до 1,3 А, коэффициент возврата на любой уставке — не менее 0,7.

Реле РТ40/1Д применяется в случаях, когда через реле может длительно проходить ток, многократно превышающий уставку срабатывания, и когда применение обычных реле РТ40 невозможно по условиям термической стойкости обмоток. При свертхоках в первичной обмотке трансформатора сердечник его насыщается, благодаря чему ток в обмотке реле возрастает незначительно. Пределы уставок от 0,15 до 1 А. Время срабатывания при токе 120 % уставки не более 0,15 с, при 300 % уставки — 0,05 с. Коэффициент возврата реле на любой уставке не менее 0,7. Номинальный ток реле 6 А.

4.1.4. Электромагнитные реле напряжения РН51/М, РНН57, РН58.

Реле РН51/М реагирует на появление или повышение напряжения постоянного тока и используется для контроля изоляции цепей. Коэффициент возврата реле не менее 0,5; потребляемая мощность не превышает 0,15 Вт. Пере-

ключение с одного диапазона уставок на другой осуществляется последовательным или параллельным соединением катушек реле. На шкале имеется только одна уставка по напряжению, которую можно изменять в небольших пределах поворотом стрелки указателя. Напряжение срабатывания реле несколько зависит также от полярности включения его обмоток, поэтому рекомендуется подводить напряжение согласно маркировке у зажимов реле.

Реле РНН57 реагирует на малые напряжения переменного тока от 4 до 8 В частотой 50 Гц. Благодаря LC-фильтру на входе реле автоматически загроубляется при искажении формы кривой напряжения так, что при частоте 150 Гц напряжение срабатывания возрастает примерно в 8 раз по сравнению с уставкой, соответствующей напряжению частотой 50 Гц. Потребляемая мощность не превышает $30 \text{ В} \cdot \text{А}$ при напряжении 100 В. Реле нельзя применять в схемах, где напряжение на его обмотке может длительно превышать уставку срабатывания более чем в 2—3 раза.

Реле *максимального напряжения РН58* реагирует на повышение напряжения и применяется в схемах РЗА, когда требуется высокий коэффициент возврата реле. Переключение числа витков первичной обмотки трансформатора позволяет получить два диапазона уставок, плавное изменение которых производится потенциометром, подключенным к вторичной обмотке. Обмотки исполнительного органа (реле РН50) присоединены к ней через выпрямительный мост и стабилитроны, служащие для повышения коэффициента возврата реле. Диапазон напряжений срабатывания реле от 50 до 100 В, коэффициент возврата около 0,9; потребляемая мощность на первой уставке не более 1,5 Вт, на последней — не более 4 Вт.

4.1.5. Реле максимального тока серий РТ80, РТ90 (индукционные). Реле серии РТ80 (ИТ80) применяются для защиты распределительных сетей, трансформаторов и двигателей при перегрузках и коротких замыканиях. Реле состоит из двух элементов: индукционного, создающего ограниченно зависящую от тока выдержку времени, и электромагнитного, обеспечивающего срабатывание реле без выдержки времени при больших токах КЗ (отсечку).

Магнитопровод реле является общим для индукционного и электромагнитного элементов. Он имеет две ветви и делит магнитный поток на две составляющие. Основная ветвь (собственно магнитопровод) представляет собой прямоугольный сердечник с воздушным зазором между полюсами, другая ветвь — это магнитный шунт и якорь отсечки с воздушным зазором.

Индукционный элемент состоит из основного магнитопровода с обмоткой на одном из стержней; алюминиевого диска, закрепленного на оси в подпятниках поворотной рамки; тормозного постоянного магнита и червячной передачи в виде червяка на оси диска и зубчатого сектора. Каждый полюс магнитопровода охвачен короткозамкнутым витком (экраном). Благодаря этому магнитный поток в воздушном зазоре расщепляется на две составляющие, сдвинутые пространственно и по фазе. В результате взаимодействия этих магнитных потоков с наведенными ими в диске токами создается вращающий момент, пропорциональный значениям потоков и синусу угла сдвига между ними и не зависящий от того, вращается диск или он неподвижен. Когда магнитный поток пропорционален току, вращающий момент пропорционален квадрату тока в обмотке реле.

На вращающийся диск действует не только вращающий, но и тормозной момент. Тормозной момент вызывается рядом факторов, главными из которых являются взаимодействие токов «резания», индуктированных в диске при его вращении, с магнитными потоками в воздушном зазоре основного электромагнита, и взаимодействие поля постоянного магнита с наведенными им токами. Тормозной момент пропорционален частоте вращения диска, поэтому при равенстве вращающего и тормозного моментов частота вращения пропорциональна квадрату тока.

Однако пропорциональность магнитного потока создавшему его току сохраняется до насыщения сердечника, после чего с возрастанием тока магнитный поток почти не изменяется, а соответственно, остаются практически неизменными вращающий момент и частота вращения. Вращающее и тормозное усилия, оказывающие противоположное действие на вращение диска, на рамку действуют согласно. Диск начинает вращаться при токах 20—30 % от тока срабатывания индукционного элемента, но реле при этом не срабатывает, так как пружина удерживает рамку в оттянутом положении. При токе уставки реле суммарное усилие преодолевает силу пружины, рамка поворачивается, и зубчатый сектор приходит в зацепление с червяком. Сектор начинает подниматься и по истечении выдержки времени, определяемой уставкой, поворачивает якорь системы отсечки, который посредством толкателя действует на переключение контактов. При заданном числе оборотов выдержка времени обратно пропорциональна частоте вращения диска. Следовательно, при небольшой кратности тока по отношению к току срабатывания реле выдержка времени обратно пропорциональна квадрату тока, а после насыщения сердечника от тока не зависит. Таким образом, в соответствии с насыщением магнитной системы создаются зависимая и независимая части времятоковой характеристики реле. В качестве примера на рис. 32 помещены характеристики реле типов РТ81, РТ83, РТ85.

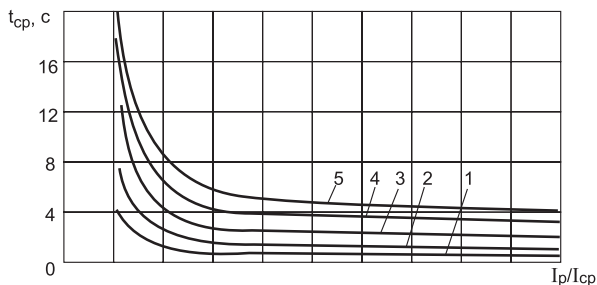


Рис. 32. Времятоковые характеристики реле типов РТ81, РТ83, РТ85 с уставками: 1 — 0,5 с; 2 — 1 с; 3 — 2 с; 4 — 3 с; 5 — 4 с; I_p — ток в обмотке реле; $I_{ср}$ — ток срабатывания индукционного элемента; $t_{ср}$ — время срабатывания индукционного элемен-

Характеристика переходит в независимую часть у реле РТ80 при кратности 8—10, а у реле РТ90 при 3—4.

Выдержка времени устанавливается по шкале времени на щитке реле и определяется начальным положением толкателя. Время на шкале указано для независимой части характеристики. Регулирование тока срабатывания осуществляется ступенчатым изменением числа витков обмотки.

Когда ток в реле превышает уставку отсечки, *электромагнитный* элемент срабатывает самостоятельно и якорь отсечки притягивается к магнитопроводу сразу, без выдержки времени. Практически время срабатывания электромагнитного элемента изменяется в диапазоне 0,08—0,10 с в зависимости от кратности тока в реле. Ток срабатывания электромагнитного элемента можно регулировать изменением воздушного зазора посредством регулировочного винта отсечки. На нем укреплено кольцо со шкалой, проградуированной в кратностях тока отсечки по отношению к току срабатывания индукционного элемента в пределах 2—8. Если, например, цифра 6 на шкале отсечки совмещена с неподвижной рискушкой, а уставка индукционного элемента 5 А, то уставка отсечки будет 30 А. При необходимости отсечка может быть выведена из работы вывинчиванием регулировочного винта до упора.

После исчезновения тока подвижные части реле (кроме механического указателя срабатывания) возвращаются в исходное положение: рамка — возвратной пружиной, якорь — собственной массой. При этом инерция вращающегося диска служит причиной двух нежелательных явлений: инерционного выбега и замедленного возврата. Инерционный выбег практически не зависит от тока и длится около 40 мс. Время возврата реле при снижении кратности тока от 5 до 0,7 не превышает 0,8 с, потребляемая мощность при токе срабатывания индукционного элемента — не более 10 В · А. Коэффициент возврата индукционного элемента — не менее 0,8.

Существует ряд модификаций реле РТ80. Реле типов РТ81-84 предназначены для работы в цепях постоянного или выпрямленного оперативного тока. Реле РТ81, 82 имеют один главный замыкающий контакт, действующий как мгновенно, так и с выдержкой времени. Перестановкой деталей его можно заменить на размыкающий. Реле РТ83, 84 имеют, кроме того, замыкающий сигнальный контакт, работающий с выдержкой времени при перегрузках, тогда как главный контакт работает только при КЗ. При напряжении 250 В ток через замыкающие главные контакты реле РТ81—84 — до 5 А (постоянный и переменный), через размыкающие контакты — 2 А переменного или 0,5 А постоянного тока.

Если коммутируемая цепь питается от трансформатора тока и ее полное сопротивление при токе 4 А не более 4 Ом, а при токе 50 А не более 1,5 Ом, то контакты способны шунтировать и дешунтировать эту цепь при токе до 50 А. Сигнальные контакты реле РТ83, 84, 86 могут замыкать и размыкать цепь постоянного тока до 0,2 А и переменного тока до 1 А при напряжении до 250 В.

Реле типов РТ85, 86 используются в устройствах защиты на переменном оперативном токе. Их главные контакты усилены и выполняются таким образом, что при срабатывании реле раньше замыкается контакт, подготавливающий цепь электромагнита управления (отключения выключателя или включения короткозамыкателя), а затем размыкается контакт, шунтирующий обмотку электромагнита (рис. 33), и последний срабатывает. Эти контакты могут шунтировать и дешунтировать цепь при токе до 150 А, если ее полное сопротивление не более 4 Ом при токе 4 А и не более 1,5 Ом при токе 50 А (сопротивление обмотки электромагнита падает с ростом тока из-за насыщения стали сердечника).

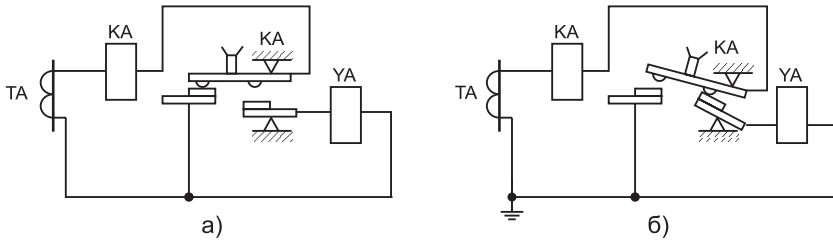


Рис. 33. К принципу работы усиленных контактов: а — нормальный режим; б — дещунтирование; ТА — трансформатор тока; КА — катушка реле; YA — электромагнит управления

Реле серии РТ90 применяются преимущественно для защиты асинхронных двигателей большой мощности с тяжелым пуском (большая кратность и длительное затухание пусковых токов). Они выполнены на основе реле РТ80, но отличаются от них более ранним переходом временной характеристики в независимую часть. Реле РТ91 снабжены такими же контактами, как РТ81, а РТ95 — усиленными контактами аналогично РТ85 и предназначены для работы на переменном оперативном токе.

Потребляемая мощность реле на любой уставке не более $30 \text{ В} \cdot \text{А}$, коэффициент возврата индукционного элемента — не менее 0,8.

4.1.6. Реле времени серий РВ и РВМ. Реле типа РВ (ЭВ) содержат в качестве воспринимающего (пускового) органа электромагнит, в качестве замедляющего (органа выдержки времени) — часовой механизм анкерного типа. Исполнительный орган — контактная система, состоящая из следующих элементов: мгновенно действующие контакты; один или два подвижных контакта; перемещающиеся колодки с неподвижными временно замыкающими (проскальзывающими) и основными контактами. Колодка основного контакта отличается наличием упора.

Реле РВ100 предназначены для работы на постоянном оперативном токе напряжением 24, 48, 110 и 220 В. Электромагнит имеет стальной цилиндрический якорь, на верхнем конце которого укреплен рычаг с толкателем, воздействующим на мгновенные контакты. При подаче напряжения на обмотку якорь втягивается, сжимая возвратную пружину, и освобождает заводной рычаг часового механизма, одновременно переключается мгновенный контакт. Часовой механизм приводит в движение траверсу с подвижными контактами, которые по истечении времени входят в соприкосновение с неподвижными контактами. Выдержка времени зависит от начального положения подвижного контакта относительно неподвижного и регулируется перемещением колодки с неподвижными контактами по окружности шкалы.

Некоторые модификации укомплектованы двумя контактами с выдержкой времени — проскальзывающим и упорным, с независимой регулировкой уставки по времени на каждом из них, причем на проскальзывающем настраивается меньшая, а на упорном — большая из уставок. В отдельных случаях допускается настройка одинаковых уставок, но настроить большую из уставок на проскальзывающем контакте невозможно. Изменение напряжения питания не влияет на работу часового механизма, а следовательно, и на выдержку

времени. При снятии напряжения якорь мгновенно возвращается в исходное положение под действием возвратной пружины.

Реле РВ200 предназначены для работы на переменном оперативном токе напряжением 100, 127, 220 и 380 В. Конструктивно реле выполнены аналогично РВ100, но в торце якоря запрессовано медное кольцо, играющее роль короткозамкнутой обмотки. Магнитный поток, создаваемый обмоткой, расщепляется на два сдвинутых по фазе потока. Результирующая электромагнитная сила, воздействующая на якорь, имеет пульсирующий характер, но нулевого значения не достигает. Благодаря этому значительно снижается вибрация якоря при его втягивании. С якорем связана система рычагов, удерживающая часовой механизм в заведенном положении. При подаче напряжения якорь втягивается, освобождая опорный рычаг, и часовой механизм перемещает контактную траверсу с подвижными контактами.

Часовой механизм некоторых типов реле (РВ215—РВ245) пускается не при втягивании, а при отпадании якоря электромагнита, когда напряжение с обмотки реле снимается. Конструкция его отличается наличием дополнительного фасонного рычага с пружиной, действие которой противоположно действию более сильной возвратной пружины электромагнита. С помощью пружины фасонного рычага можно в небольших пределах изменять как напряжение втягивания, так и напряжение возврата якоря в исходное положение. При подаче напряжения на катушку якорь втягивается, переключаются мгновенные контакты реле, и под действием фасонного рычага возвращается в исходное положение часовой механизм. При исчезновении напряжения рычаг часового механизма освобождается, и заторможенный ранее механизм приходит в действие.

В зависимости от типа реле РВ100, РВ200 выдержка времени устанавливается в пределах от 0,1—1,3 до 2,0—20 с, время замкнутого состояния проскальзывающих контактов составляет соответственно от 0,05—0,10 до 1,0—1,5 с. Разрывная мощность упорного контакта с выдержкой времени и мгновенных контактов: в цепи переменного тока не более $500 \text{ В} \cdot \text{А}$ при токе 5 А или напряжении не выше 220 В; в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой, постоянная времени которой не превышает 5 мс, — не более 100 Вт. Проскальзывающие контакты могут замыкать цепи постоянного или переменного тока с указанной мощностью, а разрывать — соответственно до 100 и 30 Вт; разрыв цепей большей мощности должен осуществляться контактами других реле. Потребление электромагнитов реле ЭВ составляет от 10 до 75 Вт.

Реле РВМ предназначено для работы на переменном оперативном токе. Воспринимающим органом служит синхронный микродвигатель, питающийся от трансформаторов тока защищаемого присоединения через промежуточный насыщающийся трансформатор. Последний ограничивает напряжение на статоре микродвигателя на уровне 10—120 В в широком диапазоне токов. Синхронная частота вращения ротора при питании от сети 50 Гц составляет 500 об/мин. Выдержка времени на замыкание неподвижных контактов устанавливается положением этих контактов. При снижении частоты выдержка времени увеличивается, при повышении — уменьшается; погрешность не более 2 % на 1 Гц. В исходное положение реле возвращается противодействующей пружиной после снятия с него напряжения.

Реле имеет две группы проскальзывающих контактов и одну — упорных. Каждая группа контактов имеет свою шкалу выдержки времени. Конструкция указателей уставок исключает возможность установки большей выдержки времени на проскальзывающем контакте. Указательная стрелка, расположенная под контактной системой, фиксирует время срабатывания реле при КЗ в сети.

Реле содержит два насыщающихся трансформатора, что позволяет включать одно реле в две фазы токовых цепей защиты. При этом следует иметь в виду, что микродвигатель должен подключаться только к одному из трансформаторов: одновременное подключение микродвигателя к двум фазам недопустимо, так как при замыкании между этими фазами напряжение на нем оказалось бы равным нулю. Переключением секций первичной обмотки насыщающихся трансформаторов можно изменять уставку по току вдвое.

Выдержка времени реле РВМ составляет 4 (РВМ12) или 10 с (РВМ13). Время возврата подвижной системы в исходное положение на максимальной уставке достигает соответственно 0,35 и 0,85—0,90 с. Разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой, постоянная времени которой не превышает 5 мс, — 100 Вт при токе до 1 А и напряжении не выше 220 В. Длительно допустимый ток замкнутых контактов 5 А. Потребляемая мощность при двойном токе срабатывания не превышает 10 В · А.

Ранее выпускались реле типов РВ73 постоянного и РВ75 переменного тока. Выполненные на электромагнитном принципе, они отличаются от реле типа ЭВ тем, что имеют привод не соленоидного, а клапанного типа с якорем, свободно вращающимся на своей оси. При подаче на обмотку реле напряжения якорь втягивается. Контактная группа реле может содержать замыкающий и размыкающий контакты, переключающиеся с установленной выдержкой времени, а также мгновенные контакты. Некоторые модификации имеют вместо мгновенных дополнительные проскальзывающие контакты. Изменение пределов шкалы достигается применением различных передаточных отношений между шестернями часового механизма. При работе на обмотку промежуточного реле нагрузка на контакты не должна превышать 0,3 А для напряжения 220 В, 0,6 А для напряжения 110 В постоянного тока и 1,5 А для напряжения 220 В переменного тока.

4.1.7. Реле промежуточные и указательные. Промежуточные реле применяются в различных схемах защиты и автоматики в тех случаях, когда коммутационная способность или количество контактов основных реле недостаточны. Реле работают как на постоянном, так и на переменном токе. В основе конструкции — электромагнит клапанного типа. Электромагнитная сила, действующая на якорь, пропорциональна квадрату магнитного потока в воздушном зазоре или в конечном счете прямо пропорциональна квадрату тока в обмотке и обратно пропорциональна квадрату длины воздушного зазора. Под воздействием электромагнитной силы якорь притягивается к магнитопроводу, преодолевая противодействующую силу пружины, а возвращается в исходное положение с помощью возвратной пружины.

После подачи напряжения на обмотку реле ток в ней начинает возрастать, и по достижении им значения тока трогания, когда электромагнитная сила превысит противодействующие силы (пружины, трения в осях и др.), якорь

начнет движение в сторону магнитопровода. Время, в течение которого ток в обмотке возрастает от нуля до тока трогания, называется *временем трогания*. Время, прошедшее с момента трогания якоря до момента окончания его движения, называется *временем движения* при срабатывании, а сумма этих двух интервалов составляет *время срабатывания* реле.

После снятия напряжения с обмотки ток в ней спадает и по достижении значения тока возврата якорь отпадает. Длительность этого процесса характеризуется *временем отпускания*, которое зависит в основном от задерживающего действия вихревых токов. Перемещение якоря в исходное положение происходит за *время движения* при отпадании, которое зависит от силы нажатия контактов, силы возвратной пружины, массы якоря и от сил трения. Сумма двух последних интервалов составляет *время возврата* реле.

Повышение быстродействия реле достигается совершенствованием конструкции, замедление работы может быть получено как конструктивным, так и схемным путем. С этой целью в конструкцию реле вводится массивная медная гильза или кольца, которые надеваются на полюс электромагнита. Индуктированный в них ток создает свой магнитный поток, направленный навстречу основному магнитному потоку при срабатывании реле и согласно с ним при отключении. В результате изменение суммарного потока замедляется, и, как следствие, увеличивается время срабатывания и возврата. С помощью медной гильзы можно получить замедление при срабатывании порядка 0,1—0,3 с, при возврате до 1 с. Схемные решения показаны на рис. 34. Необходимая выдержка времени промежуточного реле КЛ создается здесь подбором соответствующих значений сопротивления резистора R и емкости конденсатора C. Схема на рис. 34а обеспечивает определенную выдержку времени при срабатывании и возврате реле, на рис. 34б — замедление при возврате.

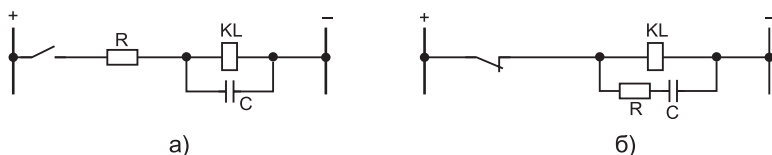


Рис. 34. Схемы включения промежуточных реле с замедлением срабатывания и возврата

Реле промежуточные серий РП23, 24 и РП25, 26 применяются в качестве вспомогательных в цепях постоянного (РП23, 24) и переменного (РП25, 26) тока. Реле выпускаются с одним размыкающим и четырьмя замыкающими контактами. Перестановкой контактных угольников и пластин можно получить и другие комбинации: 2 и 3, 3 и 2, 4 и 1. Коммутационная способность контактов при напряжении до 250 В: в цепи постоянного тока — 100 Вт при токе до 2 А, в цепи переменного тока — 500 В · А при токе до 5 А. Длительно допустимый ток контактов 5 А. Потребляемая мощность при номинальном напряжении: для реле постоянного тока — не более 5 Вт, переменного тока — не более 10 В · А (при притянutom якорe). В реле РП24 и РП26 дополнительно встроен указатель срабатывания с ручным возвратом.

Реле промежуточные *серии РП250* применяются в качестве вспомогательных реле постоянного тока, когда требуются:

- выдержка времени при срабатывании (РП251) или отпуске (РП252);
- действие реле от напряжения и удержание от тока (РП253 и РП255) либо действие от тока и удержание от напряжения (РП254); эти функции выполняются посредством параллельных и последовательных обмоток. Для создания выдержки времени служит демпферная обмотка, а также медная втулка (шайбы).

Реле типа РП254 работает с выдержкой времени на отключение, а реле РП253 может срабатывать либо с замедлением на включение, либо без него. Контактная система аналогична РП23—РП26. Выдержка времени при срабатывании для реле РП251 не должна быть более 0,07 с, а с демпферной втулкой — менее 1,1 с. Выдержка времени на отпускание для реле РП252 должна быть не более 0,5 с, а с демпферной втулкой — 1,4 с. Следует иметь в виду, что замедление на срабатывание и возврат реле РП251, 252 зависит от напряжения на обмотке, и приведенные значения верны для номинального напряжения.

Реле типа РП253 имеет время срабатывания при разомкнутой демпферной обмотке не более 0,04 с, при замкнутой — не менее 0,07 с. Реле РП254 при номинальном токе в рабочей обмотке имеет выдержку времени при срабатывании не более 0,05 с, а при отпуске — не менее 0,5 с при замкнутой демпферной обмотке. Реле РП255 при номинальном напряжении на рабочей обмотке имеет выдержку времени при срабатывании не более 0,05 с. Мощность, потребляемая обмоткой напряжения, от 3 (РП254) до 15 Вт (РП253), обмоткой тока — от 1 (РП253) до 6 Вт (РП254).

Реле *серии РП256* применяются в качестве вспомогательных в цепях переменного тока в тех случаях, когда коммутационная способность и количество контактов основных реле защиты недостаточны и требуется создание выдержки времени при снятии напряжения с обмотки реле. Присоединение обмотки реле к сети переменного тока производится через встроенный выпрямитель. Характеристики контактной системы те же, что и приведенные выше. Мощность, потребляемая цепью обмотки реле при номинальном напряжении, составляет 8 В · А. Выдержка времени на отпускание регулируется воздушным зазором между якорем и магнитопроводом и не должна быть больше 0,5 с (наименьшее значение); меньше 1,1 и больше 1,4 с (наибольшее значение).

Реле *серии РП210* являются быстродействующими. Для уменьшения постоянной времени цепи рабочей обмотки последовательно с ней введен добавочный резистор. При снятии напряжения в реле типов РП213, 214 якорь удерживается в притянутом положении при наличии тока в любой из удерживающих обмоток, а в реле РП211, 212, 215, которые токовых обмоток не имеют, подвижная система возвращается в исходное положение. Время срабатывания реле при подаче номинального напряжения не более 10 мс. Разрывная мощность контактов — не более 50 Вт при токе до 2 А или напряжении до 220 В. Допустимый ток контактов — 10 А в течение 10 с.

Реле типов РП321 и РП341 предназначены для непосредственного включения во вторичную цепь трансформаторов тока. Обмотка реле включается в цепь через встроенный насыщающийся трансформатор тока с двухсекцион-

ной первичной обмоткой. Реле имеют две уставки по току, определяемые последовательным (2,5 А) или параллельным (5 А) соединением секций. Допускается длительное протекание по первичной обмотке НТТ тока 10 А (при параллельном соединении секций) и в течение 4 с тока 150 А. Потребление реле при токе, равном двойному току срабатывания, не более $6 В \cdot А$, время срабатывания — не более 0,05 с.

Контакты нормальной мощности способны разрывать переменный ток до 2 А при напряжении до 220 В, замыкать цепь тока до 15 А и длительно пропускать ток до 5 А. Реле РП341 снабжено усиленными контактами, которые способны шунтировать и дешунтировать отключающие катушки выключателей при переменном токе до 150 А.

Реле типа РП311 применяются в схемах защиты и автоматики на переменном оперативном токе напряжением 100, 127 и 220 В. Контактная система реле такая же, как и у реле РП321. Реле четко срабатывает при напряжении 70 % номинального и отпадает при снижении его до значения не менее 3 % номинального напряжения. Мощность, потребляемая обмоткой при номинальном напряжении и притянута якоря, не превышает $6 В \cdot А$.

Реле типа РП361 включаются во вторичную цепь трансформаторов тока. Реле имеет два замыкающих контакта обычной конструкции и один контакт повышенной мощности, переключающийся без разрыва цепи. Замыкающие контакты коммутируют цепь переменного тока мощностью до $450 В \cdot А$ при токе до 2 А и напряжении до 250 В или цепь постоянного тока мощностью до 50 Вт при токе не более 1 А и напряжении до 250 В и допускают длительное протекание тока до 5 А. Контакт повышенной мощности может дешунтировать отключающую катушку выключателя при переменном токе до 150 А.

Обмотка реле включается в цепь через встроенный насыщающийся трансформатор. Реле имеет две уставки по току — 2,5 и 5 А и допускает длительное протекание по первичной обмотке НТТ тока 10 А, а в течение 4 с тока до 150 А. Потребляемая мощность при двукратном токе срабатывания не более $10 В \cdot А$.

Реле типа РП361 имеет аналогичные данные, но предназначено для работы в цепях постоянного тока напряжением 110 и 220 В. Потребляемая мощность при номинальном напряжении не более 10 Вт.

Реле типов РП351, РП352 — двухпозиционные, применяются в цепях переменного (РП351) и постоянного (РП352) тока. Реле имеют две магнитные системы, скрепленные скобой, на которой расположен вращающийся якорь. В верхней части якоря имеется толкатель, переключающий контакты при притягивании якоря к той или иной магнитной системе. Положение якоря фиксируется пружиной. Последовательно с обмотками реле включены блок-контакты. При подаче напряжения на обмотку, контакты в цепи которой замкнуты, якорь реле перебрасывается. После прохождения им нейтрального положения контакты в цепи работающей обмотки размыкаются, а в цепи другой — замыкаются, подготавливая тем самым работу реле в другом направлении.

Время срабатывания реле при номинальном напряжении не более 0,06 с, мощность контактов: на размыкание (разрывная) — 50 Вт при токе до 2 А или

напряжении до 220 В, на замыкание — 500 Вт при токе до 5 А или напряжении до 220 В.

Реле РП8, 9, 11, 12, двухпозиционные. Срабатывание реле происходит в результате взаимодействия двух магнитных потоков — поляризирующего и управляющего, первый из которых создается постоянными магнитами, второй — током в обмотках реле. В зависимости от полярности этого тока изменяется направление управляющего потока и, соответственно, направление срабатывания реле. Обмотки реле, в цепь которых введены размыкающие контакты, включаются только на время срабатывания реле (0,06 с). Контакты реле способны коммутировать мощность переменного тока $450 \text{ В} \cdot \text{А}$ при коэффициенте мощности не менее 0,5 и токе до 2 А или постоянного тока 50 Вт при токе не более 2 А. Длительно допустимый ток через замкнутые контакты 5 А.

Ранее в схемах управления и автоматики находили широкое применение многоконтактные промежуточные реле типа МКУ48. Реле предназначены для работы в цепях постоянного и переменного тока напряжением до 220 В. Потребляемая мощность реле постоянного тока составляет не более 3 Вт, переменного тока — не более $7,5 \text{ В} \cdot \text{А}$ (при притянutom якоре). Разрывная мощность контактов при напряжении до 220 В в цепи постоянного тока 50 Вт, в цепи переменного тока $500 \text{ В} \cdot \text{А}$. Длительно допускаемый ток через контакты не должен превышать 5 А. Время срабатывания реле с 8-ю контактными пружинами не превышает 0,035 с и 0,06 — с 16-ю.

Реле указательные типа РУ21 (ранее ЭС21, ЭС91, 92) применяются для визуальной сигнализации о действии устройств РЗА, как правило, в цепях постоянного тока. Реле («блинкер») электромагнитной системы клапанного типа с последовательной или параллельной обмоткой реагирует соответственно на появление тока или напряжения в цепи. Якорь реле, притягиваясь, освобождает флажок, который поворачивается («выпадает») и становится видимым в смотровом окошке на передней стенке кожуха. Одновременно с флажком поворачивается валик с подвижными контактами до замыкания их с неподвижными или размыкания. Перестановкой контактных мостиков можно получить различные комбинации контактов. Флажок и контакты остаются в положении срабатывания и после прекращения тока в обмотке, возврат же их производится вручную. Реле можно использовать и на переменном токе, но с учетом того, что напряжение срабатывания будет примерно вдвое выше, чем на постоянном токе.

Реле выпускаются на номинальный ток (срабатывания) от 0,006 до 4 А, причем длительно допускаются втрое большие значения, и номинальные напряжения постоянного тока 24, 48, 110 и 220 В. Разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой 50 Вт, в цепи переменного тока — $250 \text{ В} \cdot \text{А}$ при напряжении до 250 В и токе до 2 А. Потребляемая мощность токовых реле не более 0,25 Вт, реле напряжения — не более 2,75 Вт.

Следует заметить, что в настоящее время на рынке электроаппаратной продукции предлагается широкий выбор электромеханических промежуточных реле, отличающихся повышенными эксплуатационными и массогабаритными показателями. Так, например, итальянская фирма FINDER выпускает миниатюрные реле высотой 15 мм и толщиной всего 5 мм с самозачищающимися контактами, с током коммутации 6 А, снабженные тест-кнопкой, инди-

каторами подачи напряжения и срабатывания контактов. Благодаря надежной конструкции и самозащиту контактов обеспечивается чрезвычайно большой срок службы различных групп реле (до $5 \cdot 10^7$ циклов переключений).

4.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит

4.2.1. Реле дифференциальных защит серий РНТ и ДЗТ10. На подстанциях реле этих серий используются в схемах дифференциальных защит трансформаторов, электродвигателей, реакторов, сборных шин, с получением тормозных характеристик от одной или нескольких групп трансформаторов тока. Реле серии ДЗТ10 применяются в тех случаях, когда отстройка от периодической составляющей токов небаланса при внешних КЗ приводит к недопустимому заглублению дифференциальной защиты с реле РНТ.

4.2.1.1. Реле РНТ. Основными элементами реле являются промежуточный насыщающийся трансформатор (НТТ) и исполнительный орган — реле РТ40 или ЭТ521. НТТ обеспечивает отстройку реле от токов небаланса при переходных процессах и одновременно компенсацию неравенства вторичных токов в плечах дифференциальной защиты (ДЗ). Трансформатор имеет трехстержневой сердечник (рис. 35).

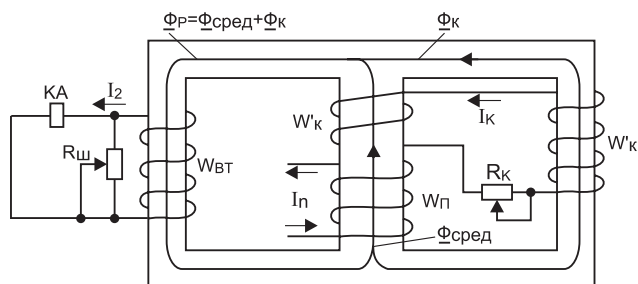


Рис. 35. К принципу устройства реле РНТ: $w_{\text{п}}$ — первичные обмотки; $w_{\text{вт}}$ — вторичная обмотка; $w_{\text{к}}^{\text{I}}$, $w_{\text{к}}^{\text{II}}$ — короткозамкнутая обмотка; $R_{\text{к}}$, $R_{\text{ш}}$ — регулируемые резисторы; КА — обмотка исполнительного реле

При повреждении в зоне действия ДЗ ток $I_{\text{п}}$ в первичной обмотке быстро становится синусоидальным и трансформируется в часть $w_{\text{к}}^{\text{I}}$ короткозамкнутой обмотки, в цепи которой возникает ток $I_{\text{к}}$. Магнитные потоки среднего $\Phi_{\text{сред}}$ и правого $\Phi_{\text{к}}$ стержней суммируются, и результирующий поток $\Phi_{\text{р}}$ вызывает ток I_2 в реле КА. При срабатывании реле магнитная индукция в левом стержне составляет порядка 1,1–1,2 Тл, а в среднем и правом стержнях — около 0,4 Тл.

При внешних КЗ апериодическая составляющая затухает длительно и почти не трансформируется. В этом режиме наличие ее, аналогично постоянному току, приводит к насыщению магнитопровода и, следовательно, ухудшению трансформации периодической составляющей тока и увеличению тока срабатывания (заглублению) реле. Улучшается также отстройка защиты от неуста-

новившихся токов в неаварийных режимах (включение трансформатора под напряжение и др.).

Загрублению способствует и влияние короткозамкнутой обмотки, которое зависит от соотношения ее активного и реактивного сопротивлений. На отпайках с малым числом витков преобладает активное сопротивление короткозамкнутой цепи, с большим числом витков — реактивное (индуктивное сопротивление обмоток). С ростом насыщения стали индуктивное сопротивление уменьшается, соответственно, возрастают ток и размагничивающее действие короткозамкнутой обмотки и степень загрубления реле. Если число витков не регулируется (РНТ565—РНТ567), изменение соотношения активного и реактивного сопротивлений и, следовательно, степени загрубления реле достигается посредством резистора R_k ; наибольшая степень отстройки будет при $R_k = 0$.

Таким образом, при наличии в первичном токе апериодической составляющей происходит автоматическое загрубление реле из-за насыщения сердечника НТТ и влияния короткозамкнутой обмотки. Недостатком такого способа отстройки является замедление работы защиты при КЗ в зоне. В этом случае реле как бы «выжидает», пока апериодическая составляющая тока КЗ не снизится.

Поведение реле РНТ в схемах ДЗ в переходных режимах с апериодической составляющей тока принято оценивать по характеристикам зависимости *относительного тока срабатывания* реле $I_{cp,o} = I_{cp,a}/I_{cp}$ от *коэффициента смещения* $\kappa_{cm} = I_a/I_{cp,a}$: $I_{cp,o} = f(\kappa_{cm})$, где $I_{cp,a}$ — периодическая составляющая тока срабатывания при наличии апериодической составляющей; I_{cp} — ток срабатывания реле при отсутствии апериодической составляющей (действующее значение синусоидального тока); I_a — апериодическая (или постоянная) составляющая тока в реле.

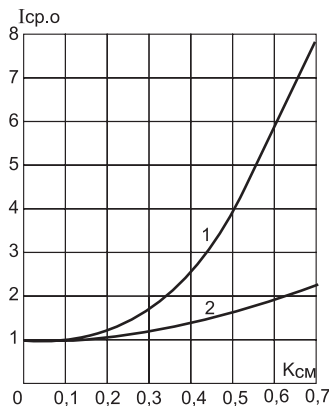


Рис. 36. Характеристики зависимости относительного тока срабатывания реле РНТ от коэффициента смещения κ_{cm} при различных значениях сопротивления R_k : 1 — $R_k = 0$; 2 — $R_k = 10 \text{ Ом}$

Коэффициент κ_{cm} характеризует смещение кривой тока заданной формы относительно оси времени и может изменяться в пределах от 0 при отсутствии апериодической составляющей до 1,41 при максимально возможном ее значении, равном амплитуде синусоидальной составляющей тока.

Относительный ток срабатывания при отсутствии апериодической составляющей равен 1.

Первичная обмотка w_n состоит из рабочих (дифференциальных) и уравнивательных обмоток. Рабочие обмотки включаются в дифференциальную цепь защиты на разность токов плеч, а уравнивательные используются для компенсации неравенства МДС, обусловленных токами плеч защиты. В схеме защиты двухобмоточного трансформатора достаточно использовать одну уравнивательную обмотку. Как правило, к рабочей обмотке подключают цепи трансформаторов тока той стороны, где вторичный ток больше. Число витков и полярность обмоток выбираются с тем условием, чтобы при внешнем КЗ или в рабочем режиме ток в исполнительном реле отсутствовал, для чего результирующий магнитный поток должен быть равен нулю. При повреждении в защищаемой зоне магнитные потоки, обусловленные МДС первичных обмоток, суммируются и обеспечивают надежное срабатывание реле. МДС срабатывания определяется как произведение тока срабатывания на число включенных витков первичной обмотки и должна быть равна 100 ± 5 АВ (РНТ565, 566) или 60 ± 4 АВ (РНТ562, 563).

Разрывная мощность контактов реле в цепи постоянного тока с индуктивной нагрузкой (постоянная времени не более 5 мс) равна 60 Вт при напряжении до 250 В или токе до 2 А. Время действия реле при первичном токе, равном трехкратному току срабатывания, не превышает 0,04 с, при двухкратном токе — 0,05 с.

4.2.1.2. Реле РНТМ. Повышенную чувствительность дифференциальных токовых защит к внутренним КЗ обеспечивает реле РНТМ — модернизированный вариант реле РНТ. Это реле позволяет установить ток срабатывания ДЗ порядка 0,3—0,5 номинального тока защищаемого присоединения, тогда как с помощью реле РНТ достигается уставка 1,3—1,7. При искажении формы тока в переходных режимах специальное полупроводниковое устройство автоматически увеличивает ток срабатывания реле путем шунтирования обмотки исполнительного органа КА регулируемым резистором. При внутренних КЗ, когда ток близок к синусоидальному, устройство не срабатывает и реле не загроубляется. Таким устройством в автономном исполнении может быть дополнена и защита с реле РНТ, находящимися в эксплуатации.

В дифференциальных защитах некоторых видов оборудования, как, например, трансформаторы с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН), при внешних КЗ возможно протекание значительных синусоидальных токов небаланса, на которые данное устройство не реагирует. Для предотвращения излишнего срабатывания ДЗ в этом случае в устройство введен так называемый канал загроубления по току плеча защиты, который при превышении максимального значения тока нагрузки защищаемого объекта выдает команду на включение шунтирующего резистора.

4.2.1.3. Реле ДЗТ. Реле позволяет уменьшить ток срабатывания и повысить чувствительность защиты при внешних КЗ, обеспечив отстройку от токов небаланса за счет магнитного торможения. Реле ДЗТ10 аналогично по устройству и параметрам реле РНТ, но имеет на крайних стержнях магнитопровода катушки тормозной и вторичной обмоток с равным количеством витков. Тор-

мозная обмотка включается в одно из плеч дифференциальной защиты. Наличие ответвлений тормозной обмотки позволяет ступенчато регулировать степень отстройки от токов небаланса, которая будет наибольшей при включении всех витков обмотки.

Ток в тормозной обмотке создает магнитный поток, подмагничивающий крайние стержни магнитопровода, благодаря чему ухудшаются условия трансформации между первичной и вторичной обмотками и ток срабатывания исполнительного реле автоматически возрастает — реле загрубляется (тормозится). Зависимость МДС срабатывания F_{cp} от МДС тормозной обмотки F_T показана на рис. 37 в виде тормозных характеристик. Торможение наиболее эффективно при угле сдвига фаз между токами тормозной и рабочей обмоток в диапазоне $0 \pm 30^\circ$, наименее эффективно — в диапазоне $90 \pm 30^\circ$. Поведение защиты оценивается коэффициентом торможения $k_T = I_{cp}/I_T = F_{cp}W_T/F_TW_p$, где w_T, w_p — числа витков тормозной и рабочих (первичных) обмоток.

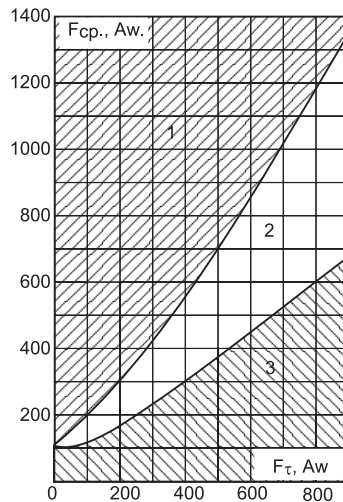


Рис. 37. Тормозные характеристики реле серии ДЗТ-10: 1 — зона срабатывания; 2 — зона срабатывания или торможения в зависимости от угла между векторами тормозного и рабочего токов; 3 — зона торможения; F_{cp} — МДС срабатывания, определенная по характеристике безусловного торможения; F_T — МДС торможения

При отсутствии торможения и при нормальной (заводской) затяжке пружин исполнительного реле МДС, необходимая для его срабатывания, должна быть $F_{cp} = 100 \pm 5 \text{ A} \cdot \text{В}$. Установить значение тока срабатывания без изменения затяжки пружины можно посредством шунтирующего резистора $R_{ш}$.

У реле серий РНТ и ДЗТ10 вследствие нелинейности кривой намагничивания стали отсутствует прямая пропорциональность между током I_1 первичной цепи НТТ и вторичным током I_2 в исполнительном органе. В связи с этим качество настройки исполнительного органа и исправность НТТ реле косвенно характеризуются коэффициентом надежности, который определяется как отношение вторичного тока $I_{2(k)}$ к току срабатывания реле I_{2cp} при заданной кратности K первичного тока $I_{1(k)}$ по отношению к тому его минимальному

значению I_{1cp} , при котором реле срабатывает: $K = I_{1(k)}/I_{1cp}$. Обычно принимают два значения $K = 2$ и $K = 5$ и рассматривают соответственно два значения коэффициента надежности $K_{н2} = I_{2(2)}/I_{2cp}$ и $K_{н5} = I_{2(5)}/I_{2cp}$, т. е. при токах $2I_{1cp}$ и $5I_{1cp}$. У исправных реле коэффициенты надежности должны быть в пределах $K_{н2} = 1,2-1,3$ и $K_{н5} = 1,35-1,5$. Заниженное значение коэффициента надежности свидетельствует о быстром насыщении НТТ и снижении надежности работы реле при повреждениях в защищаемой зоне, а завышенное — о низком значении индукции в НТТ, т. е. об ухудшенной отстройке от бросков тока.

4.2.2. Реле направления мощности.

4.2.2.1. Назначение и устройство. Реле направления мощности применяют в схемах РЗА, когда требуется определять направление (знак) активной или реактивной мощности. Различные модификации реле реагируют на токи и напряжения прямой, обратной или нулевой последовательности.

Устройство реле основано на индукционном принципе (рис. 38). Оно состоит из замкнутого стального магнитопровода 1 с четырьмя выступающими внутрь полюсами и двумя секционированными обмотками, к одной из которых (*поляризующей*) подводится напряжение (поляризация по напряжению) или ток (поляризация по току), к другой — ток (токовая обмотка). Токовая обмотка 2 расположена на противоположных полюсах 3 и 4 и создает магнитный поток Φ_r . Поляризующая обмотка 5 (обмотка напряжения) расположена на ярме и создает магнитный поток Φ_n , проходящий через полюсы 6 и 7 и сдвинутый в пространстве относительно потока Φ_n на угол 90° .

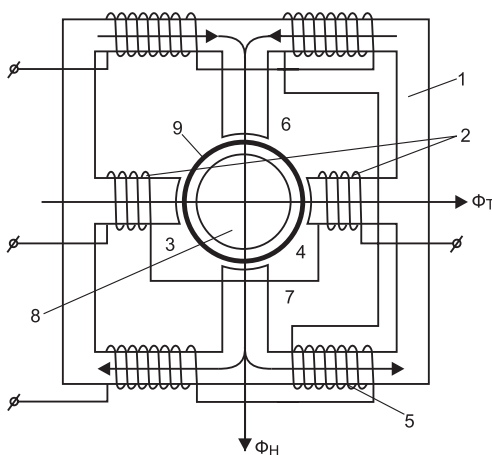


Рис. 38. Устройство индукционного реле направления мощности

Между полюсами расположены неподвижный стальной сердечник 8, служащий для уменьшения воздушного зазора между полюсами, и ротор 9 (барabanчик с алюминиевыми стенками), на оси которого укреплен подвижный контактный мостик. Контакты реле замыкаются при его срабатывании и размыкаются при возврате подвижной системы в исходное положение под действием противодействующей пружины. В зависимости от назначения реле

могут иметь один или два контакта (реле одностороннего или двустороннего действия).

Взаимодействие магнитных потоков Φ_T и Φ_H с индуцированными токами в стенках ротора создает на нем вращающий момент

$$M = k_{\Phi} \Phi_T \Phi_H \sin \psi,$$

где ψ — угол фазного сдвига между потоками Φ_T и Φ_H .

Считая, что у реле с поляризацией по напряжению магнитные потоки Φ_T и Φ_H пропорциональны соответственно току и напряжению, подведенным к обмоткам, получим:

$$M = k U_p I_p \sin (\gamma_H - \varphi_p),$$

где γ_H — фазный угол между напряжением U_p и током I_H (внутренний угол реле), определяемый соотношением активного и реактивного сопротивлений цепи напряжения реле; φ_p — фазный угол между напряжением U_p и током I_p (рис. 39), определяемый параметрами сети и схемой включения.

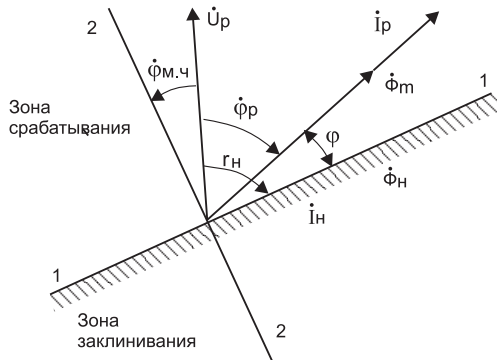


Рис. 39. Векторная диаграмма индукционного реле мощности с поляризацией по напряжению

Если цепь напряжения реле выполнить так, чтобы ее активное сопротивление было много меньше реактивного, и принять, что угол $\gamma_H = 90^\circ$, то вращающий момент будет пропорционален активной мощности P_p на зажимах реле:

$$M = k U_p I_p \cos \varphi_p = k P_p.$$

Такие реле, реагирующие на активную мощность, называют *реле активной мощности*, или *косинусными*.

Если же, наоборот, активное сопротивление цепи напряжения намного превышает реактивное и угол $\gamma_H = 0$, то можно получить *реле реактивной мощности* (Q_p), или *синусное*, вращающий момент которого будет пропорционален реактивной мощности:

$$M = k U_p I_p \sin \varphi_p = k Q_p.$$

Наибольшее распространение в схемах РЗА имеют *реле смешанного типа*.

В общем случае вращающий момент достигает максимального значения, когда

$$\sin \psi = 1, \text{ т. е. } \psi = 90^\circ \text{ или } \varphi_p = 90^\circ - \gamma_n.$$

Знак минус показывает, что угол φ_p откладывается в сторону, противоположную направлению отсчета угла γ_n . Значение угла φ_p , при котором вращающий момент получается максимальным, называют *углом максимальной чувствительности* и обозначают $\varphi_{м.ч.}$ или $-\varphi_p$:

$$\varphi_{м.ч.} = \gamma_n - 90^\circ.$$

Угол $\varphi_{м.ч.}$ задается в каталогах и справочных документах, причем знак «+» соответствует отставанию вектора тока от вектора напряжения, а знак «-» — опережению.

С другой стороны, вращающий момент становится равным нулю, когда $\sin \psi = 0$, т. е. $\psi = 0$ или $\psi = 180^\circ$, а значит, $\varphi_p = \gamma_n$ или $-\varphi_p = 180^\circ - \gamma_n$. Линия 1—1, расположенная под этими углами к вектору напряжения U_p , называется *линией нулевых моментов*, или *линией изменения знака момента*, а перпендикулярная ей линия 2—2, проведенная через начало координат и составляющая угол $\varphi_{м.ч.}$ с напряжением U_p , — *линией максимальных моментов*. Когда вектор тока I_p совпадает с линией 2—2, момент на реле будет максимальным. Расположение контактов и полярность обмоток подобраны так, что максимальный момент на замыкание контактов обеспечивается тогда, когда ток I_p (и поток Φ_T) опережает ток I_n (и поток Φ_n) на 90° , т. е. когда вектор тока I_p опережает вектор U_p на угол $\varphi_{м.ч.}$. Область выше линии 1—1, где момент имеет положительное значение, называется *зоной срабатывания реле*. При переходе вектора I_p за линию 1—1 знак вращающего момента изменится на обратный, и момент будет направлен не на замыкание контактов, а в противоположную сторону, и потому область ниже линии 1—1 называется *зоной заклинивания*. Таким образом, реле реагирует не только на абсолютное значение мощности, но и на ее направление.

Реле направления мощности имеют две основные характеристики:

1) *характеристика чувствительности*. Чувствительность реле характеризуется мощностью, при которой оно срабатывает, $S_{ср} = U_{ср} I_p$. Принято оценивать чувствительность посредством вольт-амперной характеристики, которая представляет собой кривую зависимости напряжения срабатывания $U_{ср}$ от тока I_p . Зависимость $U_{ср}(I_p)$ снимается при неизменном значении угла фазного сдвига между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности реле: $\varphi_p = \varphi_{м.ч.}$

2) *угловая характеристика* отражает зависимость мощности $S_{ср}$ или напряжения $U_{ср}$ срабатывания реле от угла φ_p при неизменном значении тока $I_p = \text{const}$ и определяет зоны работы и заклинивания реле. Обычно используется упрощенная угловая характеристика, как на рис. 39, где минимальная мощность срабатывания реле предполагается равной нулю. Анализ поведения реле ведется на основании выражения для вращающего момента, в которое введен угол максимальной чувствительности $\varphi_{м.ч.}$ вместо внутреннего угла $\gamma_n = \varphi_{м.ч.} + 90^\circ$:

$$M = kUI \cos(\varphi_p - \varphi_{м.ч.}).$$

Отечественной промышленностью выпускаются реле направления мощности трех основных типов (вместо ИМБ):

1) реле типа РБМ171 одностороннего и РБМ271 двустороннего действия. В зависимости от сопротивления, введенного в цепь напряжения, угол максимальной чувствительности составляет $\varphi_{м.ч} = -30^\circ (-25^\circ)$ или $\varphi_{м.ч} = 60^\circ$, и, стало быть, момент вращения будет

$$M = \kappa U_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$$

или

$$M = \kappa U_p I_p \cos(\varphi_p + 60^\circ).$$

Эти реле используются в комплектах защит от междуфазных КЗ;

2) реле типа РБМ177, 178 одностороннего и РБМ277, 278 двустороннего действия. Реле РБМ178 (278) отличаются более высокой чувствительностью и не могут длительно находиться под номинальным напряжением. В цепь обмотки напряжения этих реле, кроме резистора, введен конденсатор, так что ток в цепи имеет емкостный характер, угол $\gamma_n = -20^\circ$, а угол $\varphi_{м.ч.} = 70^\circ$ и вращающий момент

$$M = \kappa U_p I_p \sin(\varphi_p + 20^\circ).$$

Реле этого типа используются в защитах от замыканий на землю, в схемах автоматики.

В защитах от замыканий на землю к реле подводятся ток и напряжение нулевой последовательности (поляризация по напряжению) или токи нулевой последовательности (токовая поляризация) в зоне действия защиты и вне ее.

Реле РБМ характеризуются следующими параметрами: номинальное рабочее напряжение — 100 В; мощность, потребляемая токовыми цепями при номинальном токе, — не более 10 В · А, цепями напряжения — 40 В · А; разрывная мощность контактов в цепи постоянного тока 60 Вт при напряжении до 250 В и токе до 2 А;

3) реле типа РМОП, которые реагируют на направление мощности обратной последовательности и включаются на выход фильтров тока и напряжения обратной последовательности в схемах защит от несимметричных КЗ.

Пределы изменения уставок срабатывания пускового органа (реле РТ) по току обратной последовательности составляют 1—4 А при номинальном токе 5 А и 0,2—0,8 А при номинальном токе 1 А. Потребляемая мощность при номинальных значениях тока не превышает 6 В · А, в цепях напряжения — 15 В · А на фазу. Разрывная мощность контакта реле в цепях постоянного тока составляет 50 Вт при напряжении до 220 В и токе до 2 А.

Существенным недостатком индукционных реле мощности является возможность появления самохода. *Самоходом* называется перемещение подвижной системы реле при питании только одной из обмоток, когда основной вращающий момент отсутствует. Различают самоход от тока (например, при обрывах цепи напряжения) и самоход от напряжения (например, при отсутствии тока в защищаемой линии). Причиной возникновения дополнительного вращающего момента является несимметрия магнитной системы реле. В идеальном случае, когда сердечник реле расположен точно в центре и воздушный зазор между ним и полюсами одинаков на всем своем протяжении, самоход отсутствует.

Направление действия дополнительного момента, вызывающего самоход, возможно в сторону как замыкания контактов, так и их размыкания. В первом случае самоход может привести к неселективному действию защиты (например, при близком расположении места КЗ на смежном участке, когда напряжение $U_p \approx 0$), во втором — к отказу в действии защиты вследствие загробления реле. Самоход должен быть устранен или сведен к минимуму.

4.2.3. Фильтр-реле напряжения и тока обратной последовательности.

Фильтр-реле состоит из собственно фильтра напряжения или тока обратной последовательности и реагирующего элемента, присоединенного к выходным зажимам фильтра. Для фильтра напряжений обратной последовательности (ФНОП) справедливо выражение

$$U_{\text{вых.х}} = m_u U_{\text{вх.2}}$$

где $U_{\text{вых.х}}$ — напряжение холостого хода на выходе фильтра; $U_{\text{вх.2}}$ — составляющая обратной последовательности напряжений, подведенных к входным зажимам фильтра; m_u — коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом холостого хода.

Для фильтра токов обратной последовательности (ФТОП) аналогично

$$I_{\text{вых.к}} = m_i I_{\text{вх.2}}$$

где $I_{\text{вых.к}}$ — ток на выходе фильтра в режиме КЗ (выходные зажимы замкнуты накоротко); $I_{\text{вх.2}}$ — составляющая обратной последовательности токов, подведенных к входным зажимам фильтра; m_i — коэффициент пропорциональности. Следует отметить, что все величины, входящие в эти выражения, — векторные, не исключая и коэффициент пропорциональности; индекс «2» обозначает, как принято, составляющую обратной последовательности.

4.2.3.1. Фильтр-реле напряжения обратной последовательности типа РНФ-1М. Используется в схемах РЗА в качестве органа, реагирующего на напряжение обратной последовательности при возникновении несимметричного КЗ и в начальный момент времени при ТКЗ. На рис. 40 представлена схема фильтр-реле типа РНФ 1М.

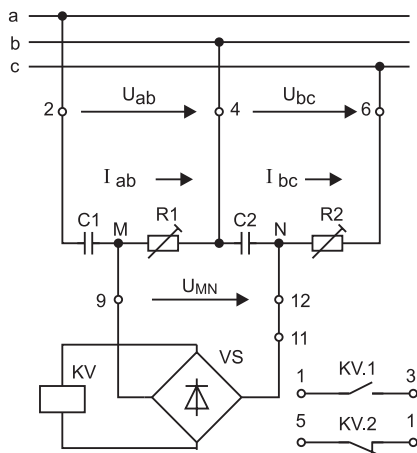


Рис. 40. Фильтр-реле напряжения обратной последовательности

В устройстве использован двухплечий активно-емкостный фильтр. Значения сопротивлений плеч выбраны в соотношении

$$R_1 = \sqrt{3}X_{C1}; \quad X_{C2} = \sqrt{3}R_2,$$

так что при подведении к зажимам 2—4—6 системы напряжений прямой последовательности ток $I_{ав}$ в плече 2—4 опережает напряжение $U_{ав}$ на угол 30° , а ток в плече 4—6 опережает напряжение $U_{вс}$ на угол 60° . В результате падения напряжения на резисторе R_1 и конденсаторе C_2 равны по значению и противоположны по направлению, а разность потенциалов между точками М и N равна нулю.

При подаче на вход фильтра напряжений обратной последовательности векторы токов и напряжений в плечах располагаются таким образом, что сумма падений напряжения на резисторе R_1 и конденсаторе C_2 становится значительной: выходное напряжение на зажимах MN в 1,5 раза превышает междуфазное входное напряжение. Напряжение нулевой последовательности, как известно, имеет одинаковое значение и направление во всех фазах. Следовательно, будут иметь одинаковый потенциал и выходные зажимы фильтра, а напряжение на его выходе будет равно нулю. Таким образом, ФНОП выделяет напряжение обратной последовательности из полного входного напряжения, не пропуская напряжения другой последовательности.

Полученные выше выводы справедливы лишь в идеальном случае, когда система входных синусоидальных напряжений симметрична, сопротивления и емкости точно соответствуют расчетным значениям и фильтр работает в режиме холостого хода (накладка 11—12 снята). Однако и при отсутствии составляющей обратной последовательности напряжение на выходе фильтра отклоняется от нуля. Это *напряжение небаланса* обусловлено отклонением параметров фильтра от расчетных значений и высшими гармоническими во входном напряжении. Наличие напряжения небаланса ограничивает применение чувствительных реле на выходе фильтра: реле может сработать в нормальном режиме, если напряжение небаланса больше его напряжения срабатывания, или не вернуться в исходное положение при исчезновении несимметрии в сети, если напряжение небаланса больше напряжения возврата реле.

При подключении к фильтру нагрузки (например, реле) выходное напряжение его несколько уменьшается по значению (до 1,1 вместо 1,5 по отношению к линейному входному) и сдвигается по фазе. Максимальная отдача мощности от фильтра достигается, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению короткого замыкания фильтра, измеренному со стороны выходных зажимов при закороченных входных зажимах. Промышленность, как правило, выпускает комплектные устройства, в которые входят фильтр и специальное реле, обеспечивающее получение от фильтра наибольшей мощности.

4.2.3.2. Фильтр-реле тока обратной последовательности. Фильтр-реле типа РТФ2. По принципу действия фильтр аналогичен рассмотренному выше ФНОП. К цепочке (рис. 41), состоящей из регулируемых резисторов R_1 и R_2 и конденсаторов C_1 и C_2 , через промежуточные трансформаторы тока TA_1 и TA_2 подводится разность (векторная) токов $I_A - I_B$ и $I_C - I_A$. Применение промежуточных понижающих трансформаторов позволяет уменьшить емкость конден-

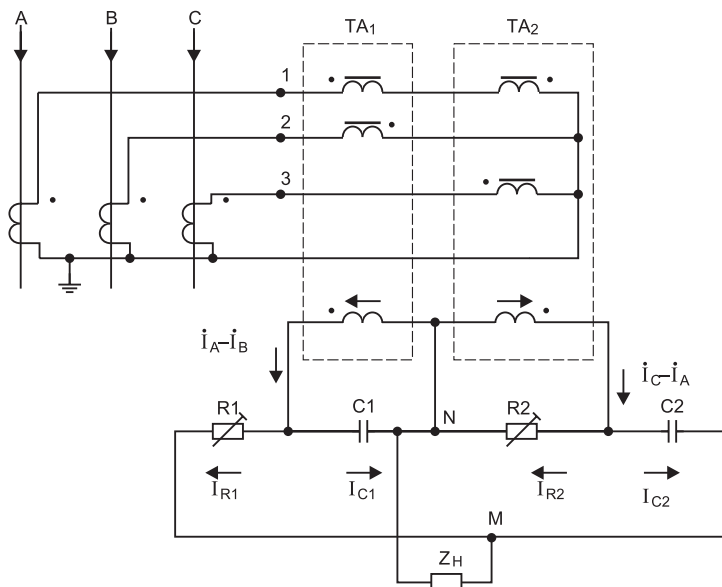


Рис. 41. Схема фильтра тока обратной последовательности реле типа РТФ2

саторов фильтра и исключить токи нулевой последовательности: поскольку эти токи во всех фазах одинаковы, разность токов двух фаз будет равна нулю. Значения активных сопротивлений и емкостей выбраны из соотношений

$$X_{C1} = \sqrt{3}R_1 \quad \text{и} \quad R_2 = \sqrt{3}X_{C2}.$$

Если при этом фильтр не нагружен (зажимы MN закорочены) и на вход его подана система токов прямой последовательности, в нем ток I_{R1} отстает от тока $I_A - I_B$ на 30° , а ток I_{C2} опережает на 30° ток $I_C - I_A$ и оказывается в противофазе с током I_{R1} . Поскольку значения этих токов одинаковы, суммарный ток на выходе фильтра будет равен нулю. При обратном порядке чередования фаз векторы токов I_{R1} и I_{C2} , равных по значению, располагаются под углом 120° друг к другу, так что сумма этих токов на выходе фильтра в 1,5 раза превышает значение токов $I_A - I_B$ или $I_C - I_A$.

Кроме фильтра, в комплект РТФ2 входят стабилитроны для ограничения напряжения на выходе фильтра, два реле, миллиамперметр для измерения тока небаланса. Одно из реле (более чувствительное) действует на сигнал, другое — на отключение. Абсолютное значение тока на выходе ФТОП зависит от сопротивления подключенной нагрузки. Максимальную мощность фильтр отдает, когда сопротивление нагрузки Z_H равно сопротивлению холостого хода фильтра, измеренному на его выходных зажимах при разомкнутых входных.

Фильтр-реле типов РТФ7/1, 7/2 не отличаются существенно от РТФ2. Здесь в качестве сигнального и отключающего органов использованы поляризованные реле. Для повышения коэффициента возврата более чувствительного сигнального реле применяется электрическое торможение. Реле имеет две катушки — рабочую и тормозную, первая из которых включена непосредственно в цепь выпрямленного выходного тока фильтра, а вторая подключена к

сети оперативного постоянного тока. Регулирование тока срабатывания обоих реле осуществляется шунтирующими резисторами. Шкалы уставок градуируются в относительных единицах, показывающих, какую долю номинального тока реле составляет ток обратной последовательности при срабатывании сигнального или исполнительного органа. В зависимости от типа фильтр-реле диапазон уставок сигнального органа составляет от 0,04 до 0,20, отключающего органа — от 0,4 до 1,2 номинального тока 1; 5 или 10 А.

Фильтр-реле типа РТ2. Схема ФТОП (рис. 42) состоит из трансформатора $ТА_\Phi$ с двумя первичными и одной вторичной обмотками и резистора R . К первичным обмоткам и резистору через зажимы 1, 3 и 5 подводятся фазные токи. Кроме того, в фильтр входит трансформатор $ТА_\kappa$, служащий для компенсации составляющей нулевой последовательности. В сетях с изолированной нейтралью, где токи нулевой последовательности отсутствуют, этот трансформатор не используется (зажимы 9—11 разомкнуты).

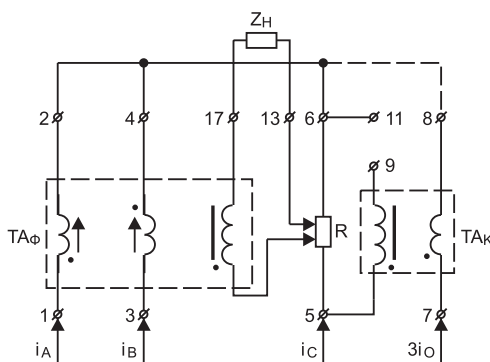


Рис. 42. Схема фильтра тока обратной последовательности реле типа РТ2

Когда токи прямой последовательности протекают по первичным обмоткам трансформатора $ТА_\Phi$, на его вторичной обмотке наводится ЭДС, пропорциональная по значению векторной разности токов $I_A - I_B$ и отстающая от последней по фазе на угол 90° . Коэффициент трансформации трансформатора $ТА_\Phi$ и сопротивление резистора R подобраны так, что ЭДС обмотки и падение напряжения на этом сопротивлении численно равны, а, так как они находятся в противофазе, напряжение на нагрузке Z_n (обмотки реле) равно нулю.

Напротив, при подаче на входные зажимы 1, 3, 5 токов обратной последовательности векторы ЭДС вторичной обмотки $ТА_\Phi$ и падения напряжения на сопротивлении R совпадают по направлению, так что выходное напряжение фильтра равно двойному значению ЭДС. Когда РТ2 используют в сетях с заземленной нейтралью, вводят в работу компенсирующий трансформатор $ТА_\kappa$, для чего зажимы 9—11 соединяют накладкой. Токи нулевой последовательности будут проходить в каждой фазе, а суммарный ток $3I_0$ в нулевом проводе пройдет по первичной обмотке $ТА_\kappa$ (зажимы 7—8). Токи фаз А и В во вторичную обмотку $ТА_\kappa$ не трансформируются, так как магнитные потоки их направлены встречно. Падение напряжения на всем сопротивлении R создается только током фазы С и компенсируется ЭДС вторичной обмотки трансформатора $ТА_\kappa$, пропорциональной току $3I_0$. Таким образом, при идеальной настройке

фильтра токи прямой и нулевой последовательности не создадут ЭДС на выходе фильтра. Однако в обмотках выходных реле всегда протекает ток небаланса, значение которого при настройке должно быть сведено к минимуму.

Фильтр-реле типа РТФ1 и РТФ2. Фильтр этих реле отличается простотой настройки и компенсации токов нулевой последовательности. Фильтр состоит из трансформатора тока ТА и трансформатора с воздушным зазором (трансреактора) ТAV, нагруженных регулируемыми резисторами R_1 и R_2 (рис. 43). Параметры трансформаторов и сопротивления резисторов выбраны так, что при протекании по первичным обмоткам трансформаторов одинаковых токов падения напряжения на сопротивлениях R_1 и R_2 равны.

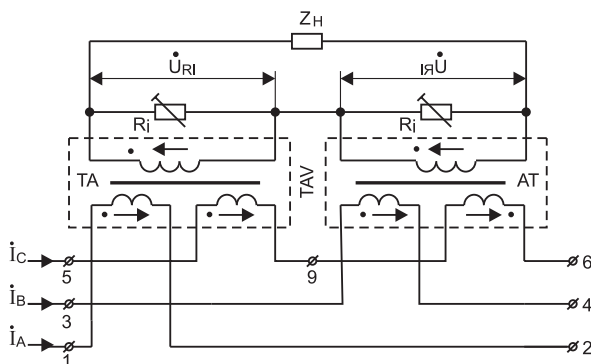


Рис. 43. Фильтр тока обратной последовательности реле РТФ1 и РТФ3

Магнитный поток в трансформаторе ТА создается разностью токов $I_C - I_A$, в трансформаторе ТAV — разностью токов $I_B - I_C$, благодаря чему токи нулевой последовательности во вторичную цепь не трансформируются. При прямом порядке следования фаз падение напряжения на сопротивлении R_1 совпадает по фазе с разностью $I_C - I_A$, а падение напряжения на R_2 находится в противофазе с ним, так как опережает вектор $I_B - I_C$ на 60° (угол сдвига между ЭДС и током вторичной цепи ТAV выбран равным 30°). В результате напряжение на выходе фильтра будет равно нулю. В случае поступления на входы 1, 3, 5 токов обратной последовательности угол фазного сдвига между напряжениями на R_1 и R_2 составит 120° , и сумма их будет достаточно велика.

Реле выпускаются на номинальные токи 1 и 5 А и имеют 4-кратный диапазон уставок по току обратной последовательности: от 0,3 до 1,2 А для реле на номинальный ток 1 А и от 1,6 до 6 А на ток 5 А. Для удвоения пределов уставок служит переключатель.

4.3. Полупроводниковая элементная база

4.3.1. Основные понятия. Рассмотренные выше электромеханические реле позволяют реализовать все функции релейной защиты, однако имеют ряд недостатков:

- большая мощность, потребляемая от измерительных трансформаторов;
- наличие подвижных частей и контактов, ограничивающих срок службы и снижающих надежность реле;

- относительно низкая вибростойкость;
- значительные масса и габариты.

Существенной особенностью полупроводниковых элементов РЗ является отсутствие подвижных частей и контактов. Поэтому построенные на полупроводниковой базе реле и защиты в целом называют бесконтактными или *статическими* (хотя иногда в качестве выходных органов и применяются контактные реле). Такие устройства имеют более высокие чувствительность и быстродействие, меньшее собственное потребление, габариты и массу, отличаются стабильностью параметров, большим сроком службы, нечувствительностью к ударам и вибрациям, просты в обслуживании и практически не требуют ремонта. В качестве базовых элементов служат диоды и транзисторы, логические элементы, интегральные микросхемы (аналоговые и цифровые) и микропроцессоры.

Для создания полупроводниковых приборов в чистые полупроводники (германий, кремний и др.) вводят специальные примеси, позволяющие резко увеличить собственную проводимость за счет появления дополнительного количества свободных носителей зарядов — отрицательных (электронов) или положительных («дырок»). В зависимости от преобладания тех или иных носителей различают полупроводники электронного или n-типа и дырочного или p-типа (от латинского *negativus* — отрицательный; *positivus* — положительный). Промежуточный слой между двумя областями разного типа носит название p-n-перехода и обладает вентильными свойствами. Если источник напряжения подключить «плюсом» к p-области, сопротивление перехода будет невелико, и через него пройдет ток, называемый прямым. При обратной полярности сопротивление перехода оказывается во много раз большим, и ток через него, называемый обратным, будет весьма мал.

4.3.2. Диоды. Простейшие полупроводниковые приборы — *диоды* содержат один p-n-переход и, соответственно, два электрода — анод и катод. Наиболее распространены выпрямительные, импульсные и опорные диоды. Одним из основных параметров *выпрямительных* диодов является номинальный ток. Это максимально допустимое по нагреву при длительной работе значение постоянного или среднего за период прямого тока. Другим классификационным параметром является номинальное обратное напряжение, или просто номинальное напряжение, которое для большинства диодов составляет до 80 % пробивного напряжения. Дифференциальное сопротивление диода — это отношение приращений напряжения и прямого тока, которое можно определить из вольт-амперной характеристики или из соотношения $R_d \approx 26/I_{пр}$, Ом, где $I_{пр}$ — прямой ток, mA (при 20 °C).

Обратное сопротивление диода находят как отношение обратного напряжения и обратного тока, причем следует учитывать, что это сопротивление увеличивается в 2—3 раза на каждые 10° повышения температуры. *Импульсные* диоды используются в качестве переключающих элементов. Длительность переходных процессов в импульсных диодах намного меньше, чем в выпрямительных. Классификационными параметрами являются максимальные значения обратного тока и напряжения. Опорные диоды, или *стабилитроны*, служат для поддержания или ограничения напряжения на определенном уровне. Падение напряжения на стабилитроне лишь незначительно изменяется при изменении проходящего через него тока в широких пределах

(область электрического пробоя). Напряжение стабилизации $U_{ст}$ является основным классификационным параметром стабилизатора. Важным параметром является также температурный коэффициент напряжения стабилизации $TKN = (\Delta U_{ст}/\Delta T)100 \%$, который показывает, на сколько процентов изменится напряжение стабилизации прибора при изменении его температуры на 1°C . К основным параметрам относят и дифференциальное сопротивление $R_d = \Delta U_{ст}/\Delta I_{ст}$, где $\Delta U_{ст}$ и $\Delta I_{ст}$ — приращения напряжения и тока на рабочем участке характеристики стабилизатора.

Переключающие диоды изготавливаются на основе четырехслойной полупроводниковой структуры р-п-р-п-типа с тремя р-п-переходами. В рабочем режиме такого прибора плюс напряжения подается на крайнюю р-область (анод), минус — на крайнюю п-область. Если у прибора сделаны только эти два вывода, то он называется динистором. При определенном значении напряжения между анодом и катодом (напряжение включения) падение напряжения на динисторе резко снижается.

У управляемых переключающих диодов — тиристоров (тринисторов), или просто *тиристоров*, ко второй р-области подключается управляющий электрод. Тиристор открывается в прямом направлении только при условии, когда на управляющий электрод подан положительный (по отношению к катоду) потенциал. После снятия отпирающего сигнала постоянный ток в цепи анод—катод не прекратится, и в большинстве случаев тиристор может быть заперт только подачей обратного напряжения или прерыванием тока с помощью коммутационного аппарата. Исключение составляет ограниченная номенклатура тиристоров, которые могут запираются по цепи управления. На переменном токе прибор будет запирается каждый раз при прохождении тока через нулевое значение, и для его повторного отпираания следует подавать управляющий сигнал. Если этот сигнал подается в момент появления положительного напряжения на аноде, то в нагрузке выделится полное выпрямленное напряжение; если же отпирающий сигнал сдвигать по фазе от этого момента в сторону отставания, выходное напряжение будет уменьшаться. Таким способом производится регулирование выходного напряжения тиристорных источников питания нагрузки выпрямленным током. Тиристоры применяются также в качестве выходных каскадов силовых ключей.

Симистор (симметричный тиристор) представляет собой эквивалент встречно-параллельного соединения двух тиристоров и способен поэтому пропускать ток в обоих направлениях.

Оптронный тиристор управляется посредством светового сигнала.

Основными классификационными параметрами тиристоров являются средний ток в открытом состоянии и максимальное значение допустимого обратного напряжения, число сотен вольт которого условились называть классом прибора (1-й класс — 100 В, 8-й — 800 В и т. д.). Диапазон номинальных значений параметров тиристоров весьма широк: ток от 1 А до нескольких тысяч ампер, напряжение от 50 В до нескольких тысяч вольт.

4.3.3. Транзисторы. *Транзисторы* (биполярные) имеют три области разных типов проводимости и два р-п перехода между ними. В зависимости от проводимости крайних областей различают транзисторы р-п-р и п-р-п типа. Край-

ние области биполярного транзистора носят названия *эмиттер* (Э) и *коллектор* (К), средняя — *база* (Б). На одноименные выводы транзисторов разных типов проводимости подаются напряжения противоположной полярности (рис. 44). Управляются биполярные транзисторы током базы.

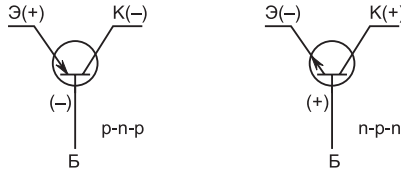


Рис. 44. Полярность электродов транзистора при включении его в схему (открыт)

Различают три схемы включения транзистора: с общим эмиттером (ОЭ), с общей базой (ОБ) и с общим коллектором (ОК) — в зависимости от того, какой электрод является общим для входной и выходной цепей. Чаще других применяется схема ОЭ.

В рабочем режиме транзистора большая часть тока эмиттера $I_{\text{Э}}$ проходит к коллектору, ток которого $I_{\text{К}} = \alpha I_{\text{Э}}$, где $\alpha = 0,90—0,997$ — коэффициент передачи эмиттерного тока, иначе — коэффициент усиления по току в схеме ОБ. Остающаяся часть тока эмиттера образует ток базы $I_{\text{Б}}$, так что $I_{\text{К}} = I_{\text{Э}} - I_{\text{Б}} = \beta I_{\text{Б}}$. Здесь $\beta \approx 10—350$ — коэффициент усиления по току в схеме ОЭ.

Возможны два предельных режима работы транзистора: режим отсечки и режим насыщения. В режиме *отсечки* прибор заперт и эмиттерный ток, а также ток коллектора близки к нулю. Режим *насыщения* наступает тогда, когда при увеличении тока базы прибор полностью открывается и ток коллектора перестает возрастать, достигнув максимального значения. В первом случае сопротивление транзистора чрезвычайно велико, во втором — близко к нулю. Когда эти режимы чередуются, говорят, что прибор работает в режиме ключа, или переключателя, аналогично контактам электромеханического реле. Параметрами предельных режимов являются:

- максимальная мощность, рассеиваемая прибором;
- максимальный ток коллектора;
- максимальное обратное напряжение между электродами.

Если требуется повысить выходную мощность, используют составные транзисторы или каскадное соединение приборов. Параллельное включение биполярных транзисторов путем непосредственного соединения электродов недопустимо, так как ток может распределиться между ними неравномерно: следует ввести в эмиттерные цепи небольшие сопротивления, выравнивающие токи.

На основе транзисторов строятся типовые схемные узлы — усилители и переключатели, а также источники питания, стабилизаторы, релейные элементы. Транзисторные устройства релейного действия выполняются обычно на основе усилителей постоянного тока с положительной обратной связью. К таким устройствам принадлежат, в частности, триггеры и нуль-индикаторы. *Симметричный триггер* срабатывает при подаче короткого управляющего сигнала и остается в этом состоянии до подачи сигнала на возврат, т. е. имеет два устойчивых состояния. *Одновибратор* может сколь угодно долго находиться

только в одном из устойчивых состояний, из другого же через некоторое время возвращается в исходное состояние. *Нуль-индикатор* срабатывает в случае изменения знака управляющего сигнала. В *реле времени* используют заряд конденсатора через резистор с большим сопротивлением.

Наряду с биполярными транзисторами, управляемыми электрическим током, большое распространение получили *полевые (униполярные, каналные)* транзисторы, управляемые электрическим полем (напряжением). Основное их преимущество — очень высокое входное сопротивление, достигающее 10^{15} Ом, и большое усиление по току и мощности. Полевой транзистор состоит из полупроводникового стержня (канала), на поверхности которого с противоположных сторон формируются р-п-переходы. Вывод с торца канала, от которого носители заряда начинают свой путь, называется *истоком*, другой, к которому они приходят, — *стоком*, а вывод от р-п-перехода — *затвором*. Поперечное сечение канала проводимости, а следовательно, его сопротивление можно изменять посредством электрического поля, создаваемого затвором. Проводящий канал при этом можно уподобить регулируемому резистору. Управление и усиление тока в полевом транзисторе осуществляется носителями заряда одного знака, откуда и одно из его названий — униполярный.

Лучшие качества полевого транзистора обеспечиваются в случае, когда затвор отделен от канала тонким изолирующим слоем, не препятствующим проникновению поля в канал. Такие структуры называют полевыми транзисторами с изолированным затвором. В отличие от полевых транзисторов с р-п-переходом, эти приборы могут работать при любой полярности напряжения на затворе. Приборы с использованием слоев металла в качестве затвора, окисла (диоксида кремния) как изолятора и полупроводника (кремния) для создания канала тока получили название *МОП-транзисторов* (металл—окисел—полупроводник). Так же как и биполярные, полевые транзисторы могут работать в режимах отсечки и насыщения, включаться по схеме с общим истоком, с общим стоком или общим затвором (по аналогии с ОЭ, ОК или ОБ), использоваться в схемах усилителей, переключателей и др., в схемах логики. Сочетание полевого и биполярного транзисторов позволяет получить приборы с высоким коэффициентом усиления и малым выходным сопротивлением. Полевые приборы одного типа можно соединять параллельно.

К числу недостатков полевых транзисторов относится значительное активное сопротивление в открытом состоянии, которое с повышением допустимого напряжения сток—исток более 250—300 В достигает нескольких ом. Кроме того, этим приборам свойственно наличие паразитных эффектов, наиболее существенный из которых проявляется как включение диода параллельно силовым электродам транзистора и особенно влияет на протекание переходных процессов в схеме.

Однопереходный транзистор имеет один р-п-переход и три электрода — эмиттерный и два базовых. Отличительная особенность этого прибора — наличие области отрицательного сопротивления на его вольт-амперной характеристике (падающий участок N-образной характеристики). Его часто применяют в схемах задания временных интервалов, в триггерах, мультивибраторах, стабилизаторах, а также для запуска силовых ключей. От обычных транзисто-

ров прибор отличается более высокой надежностью, стабильностью напряжения включения и возможностью передачи мощных импульсов.

Комбинированный транзистор типа IGBT, состоящий из управляющего полевого и выходного биполярного каскадов, удачно сочетает преимущества того и другого типа транзисторов при работе их в режиме ключа. Сокращенное название этого типа приборов происходит от английского Insulated Gate Bipolar Transistor — *биполярный транзистор с изолированным затвором*. Условное обозначение транзистора IGBT, отражающее наличие в его составе полевой и биполярной частей, показано на рис. 45.

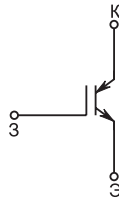


Рис. 45. Условное обозначение транзистора IGBT:
З — затвор; К — коллектор; Э — эмиттер

Быстродействие IGBT ниже, чем полевых транзисторов, но выше, чем биполярных. При переключении нельзя превышать допустимую скорость изменения напряжения на коллекторе во избежание так называемого «защелкивания» биполярной части транзистора, когда она переходит в режим открытого тиристора. В этом случае закрыть прибор сигналом управления невозможно, и он может сгореть. Фирмы-производители выпускают IGBT приборы, рассчитанные на разные частотные режимы работы. В технических условиях на конкретный прибор приводятся кривые, отражающие соответствие допустимых значений рабочей частоты и максимального тока через прибор при различной форме коллекторного тока, как показано, например, на рис. 46. Превышать нормированные значения напряжения нельзя, по току же транзисторы IGBT выдерживают кратковременные перегрузки вплоть до 10-кратных. Допустимое значение длительного (постоянного) тока коллектора нормирует-

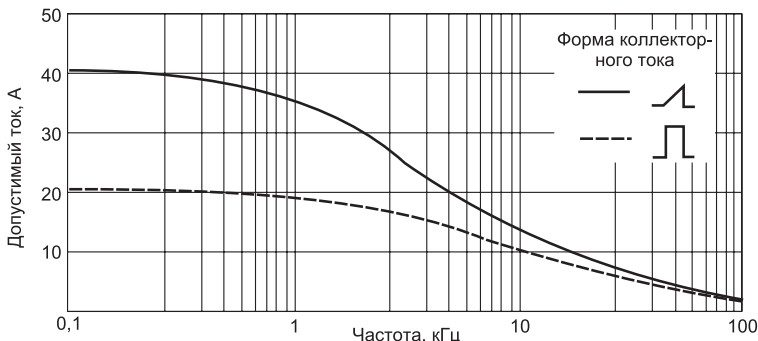


Рис. 46. Зависимость максимально допустимого тока коллектора от частоты переключений для транзистора IRG4BC30F

ся для температуры корпуса 25 и 100 °С и в этом диапазоне изменяется примерно вдвое. Транзисторы одного типоминнала можно соединять параллельно без выравнивающих резисторов в цепи эмиттера.

IGBT транзисторы выпускаются на номинальные значения напряжения до 1200 В, тока — до нескольких килоампер, что в большинстве случаев делает их вполне конкурентоспособными с мощными силовыми тиристорами, а часто и предпочтительными ввиду того, что для их запираания на постоянном токе не требуется специальных устройств и схемы в целом реализуются значительно проще.

4.3.4. Логические элементы. Известное распространение получили схемы РЗиА, выполненные на стандартных *логических элементах*. Эти элементы имеют один или несколько входов (до 8) и один выход и только два уровня входных и выходных сигналов, которые условно называют «1» (единица) и «0» (нуль). Элементы с одним входом или не изменяют состояния входного сигнала (*буфер*), или осуществляют дополнение логического состояния (изменение его на обратное), т. е. логическая 1 на входе вызывает логический 0 на выходе и наоборот (*инвертор*). Состояние выходного сигнала логических элементов с несколькими входами зависит от сочетания входных сигналов. Инвертирование обозначается кружочком на выводе при графическом отображении элемента (рис. 47) и чертой над буквенным символом.

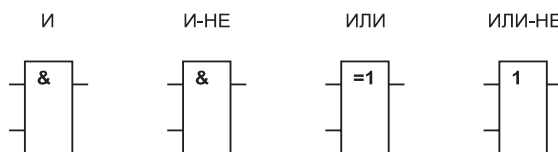


Рис. 47. Основные логические функции и графическое обозначение соответствующих логических элементов

На выходе элемента **И** логическая 1 появляется, если все входы одновременно находятся в том же состоянии 1, а все прочие комбинации входных сигналов приводят к логическому 0 на выходе. *Элемент И-НЕ* — это элемент **И** с инвертированным выходом (кружок на выходе): когда все входы одновременно находятся в состоянии логической 1, на выходе образуется логический 0. На выходе *элемента ИЛИ* появляется логическая 1, если хотя бы один из входов находится в состоянии логической 1. Сигнал 0 на выходе может появиться лишь при условии наличия 0 на всех входах. *Элемент ИЛИ-НЕ* представляет собой элемент **ИЛИ** с инвертированным выходом. Все возможные состояния входов и выходов логических элементов в отдельности или их комбинаций описываются *таблицей истинности*.

В схемах РЗиА нашла применение серия диодно-транзисторных элементов типа «Логика-Т», построенных на транзисторных переключателях. Здесь логическим 1 и 0 соответствуют состояния отсечки или насыщения выходного транзистора переключателя. В качестве единичного сигнала принято напряжение — 4...–12 В, нулевого 0...–1 В. Основным (базовым) элементом серии является транзисторный усилительный каскад, работающий в ключевом ре-

жиге. Выходной сигнал вырабатывается между общей точкой питания ОТ и коллектором транзистора. Нагрузка, присоединяемая к этим точкам, называется параллельной (рис. 48а), и единицей ее считается активное сопротивление 1,3 кОм. Последовательная нагрузка присоединяется между коллектором транзистора и шиной питания $U_{пит}$ (рис. 48б), единицей ее считается сопротивление 2,2 кОм. Число единичных параллельных и последовательных нагрузок, которые можно подсоединить к выходу элемента, характеризует его нагрузочную способность.

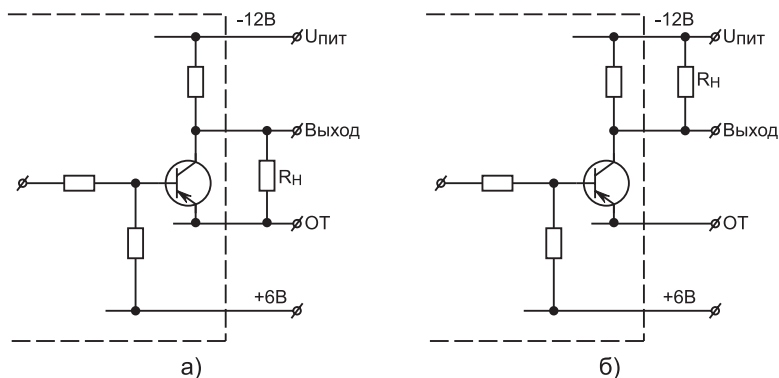


Рис. 48. Схемы подключения параллельной (а) и последовательной (б) нагрузок R_n к выходу транзисторного усилителя

Функциональные модули системы представляют собой схемы, выполненные на печатных платах и помещенные в пластмассовый корпус. В состав системы входят логические, функциональные и релейные элементы, элементы времени и усилители. Самым употребительным из *логических* элементов является транзисторный модуль Т101. Он содержит два независимых переключателя на транзисторах и имеет три независимых диодных входа. При нулевом сигнале (0) на одном из них выходной сигнал равен единице (1), и наоборот, при единичном сигнале на любом входе возникает нулевой сигнал на выходе. Такое устройство, называемое инвертором, реализует логическую операцию НЕ. Поскольку переключатель обладает способностью изменять свое состояние при подаче управляющего сигнала на один из входов, он реализует и логическую операцию ИЛИ, в связи с чем Т101 именуют еще элементом ИЛИ-НЕ. Нагрузочная способность каждого из транзисторных переключателей этого элемента — до трех параллельных или последовательных единичных нагрузок.

Специально для измерительных органов РЗ разработан *релейный* элемент Т205. Он выполнен с положительной обратной связью между выходным и входным транзисторами, благодаря которой процесс отпираания и запираания транзисторов происходит лавинообразно и время срабатывания и возврата схемы составляет соответственно около 0,01 и 0,10 с. Напряжение срабатывания может плавно регулироваться. Коэффициент возврата достигает 0,99. Элемент допускает 10-кратную перегрузку по входному току в течение 1 с и подключение на выходе до трех параллельных единичных нагрузок.

Элемент Т207 служит *нуль-индикатором*. Время срабатывания элемента не более 5 мс, коэффициент возврата не ниже 0,5 и может регулироваться. Нагрузочная способность не превышает 1,2 кОм параллельной нагрузки.

Элемент *времени* Т305 позволяет установить выдержки 0,01—20 с, для создания которых используется заряд конденсатора через резистор с большим сопротивлением. Выдержка времени может изменяться ступенчато выбором подключаемого конденсатора и плавно — перемещением движка регулируемого резистора. Допускается подключение трех последовательных или параллельных единичных нагрузок.

Напряжения питания 12 и 6 В получают с помощью компенсационных стабилизаторов Т501 (12 В) и Т502 (6 В) и преобразователя напряжения Т503. Регулирующим органом стабилизатора является составной усилитель, выходной транзистор которого включен последовательно в цепь нагрузки. Падение напряжения на нем автоматически устанавливается таким, что напряжение на нагрузке остается неизменным. Преобразователь напряжения служит для получения переменного напряжения прямоугольной формы частотой 400 Гц. На выходе преобразователя имеются диоды для выпрямления выходных напряжений 13 и 10 В переменного тока и получения соответственно 12 и 9 В выпрямленного напряжения. Допустимые нагрузки элемента — до 0,2 А.

Однако диодно-транзисторные и транзисторные защиты, в том числе построенные на этих элементах логические схемы, широкого распространения не получили, так как не удовлетворяли возросшим требованиям в части собственного потребления, габаритов, надежности и стоимости. Существенные преимущества обеспечило внедрение микроэлектронных элементов и комплектных устройств на базе интегральных микросхем (ИМС).

4.3.5. Интегральные микросхемы. *Интегральные микросхемы* и защиты на базе ИМС отличаются от аналогичных по назначению устройств на электро-механических реле или диодно-транзисторных элементах значительно меньшим потреблением мощности, меньшими габаритами и общей стоимостью, большей стабильностью параметров и точностью, надежностью, расширенным диапазоном уставок и др., проще в наладке и эксплуатации. ИМС — это помещенная в единый герметизированный корпус электрическая цепь, в которой функции отдельных элементов (диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов) или их совокупностей выполняют области из проводящих, полупроводниковых и диэлектрических материалов. В зависимости от выполняемых функций ИМС подразделяют на *логические (цифровые)* и *аналоговые*. Цифровые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам дискретных функций. Логические ИМС являются одним из видов цифровых микросхем и характеризуются двумя уровнями выходного напряжения, соответствующими «0» и «1» двоичной системы. Аналоговые ИМС предназначены для преобразования и обработки сигналов, изменяющихся по законам непрерывных функций, и характеризуются непрерывностью входных и выходных сигналов.

Основным элементом *аналоговой* микроэлектроники являются *усилители*. Усилитель — это активный четырехполюсник, характеризующийся коэффициентом усиления и входным и выходным сопротивлениями. Изображается он в виде прямоугольника или треугольника (рис. 49). Наиболее часто приме-

няются *дифференциальные* усилители (рис. 49а). Основная задача — получить на выходе напряжение, пропорциональное разности потенциалов на входах: $U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})K_U$, где K_U — коэффициент усиления по напряжению. Усилитель состоит из дифференциального каскада на транзисторах. Базы транзисторов служат входами усилителя, а коллекторы — выходами. Выходное напряжение снимается либо с одного из выходов (несимметричное включение нагрузки), либо между ними подключается нагрузка (симметричное включение). Поскольку оба входа находятся в одинаковых условиях, коэффициент усиления почти не зависит как от абсолютных значений потенциалов на входах, так и от изменения внешних условий. Но в силу того, что параметры входных цепей полностью идентичными быть не могут, потенциалы коллекторов будут несколько различаться. Для их выравнивания на вход усилителя подают регулируемое напряжение смещения. При небольших значениях входного напряжения передаточные характеристики усилителя близки к линейным, при достаточно больших входных сигналах он переходит в режим насыщения и может быть использован в схемах ограничителя, триггера Шмитта, мультивибраторов.

Операционный усилитель (рис. 49б) — это высококачественный усилитель напряжения с очень большим коэффициентом усиления, высоким входным и низким выходным сопротивлением. С помощью обратных связей можно реализовать самые разнообразные функции. Операционный усилитель, охваченный соответствующей обратной связью, может не только выполнять основные математические операции (откуда и его название), но и служить в качестве усилителя постоянного или переменного тока, активного фильтра, компаратора, генератора и др. При этом передаточная характеристика такого устройства определяется конфигурацией и параметрами цепей обратной связи и почти не зависит от усилителя. Усилитель имеет два входа и один выход. Один из входов усилителя называется неинвертирующим и обозначается знаком (+), другой — инвертирующим и обозначается знаком (-). При подаче сигнала на вход (+) выходной сигнал совпадает по фазе (полярности) с входным, а если усиливается сигнал подается на вход (-), то выходной сигнал оказывается в противофазе с ним. Коэффициент усиления по напряжению зависит от схемы включения усилителя (рис. 50).

При расчете коэффициента усиления полагают, что входное сопротивление и коэффициент усиления собственно операционного усилителя (при разомкнутой цепи обратной связи) бесконечно велики, потенциал входа (-) равен нулю, входное сопротивление равно Z_1 и весь входной ток протекает в

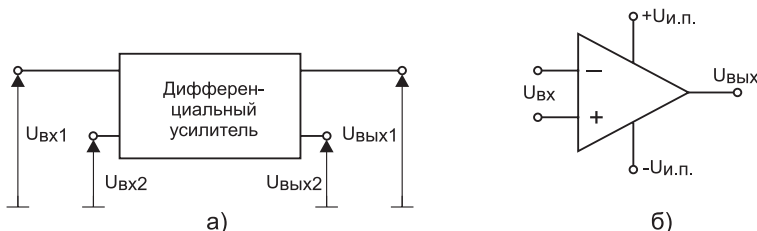


Рис. 49. Условные обозначения дифференциального (а) и операционного (б) усилителей

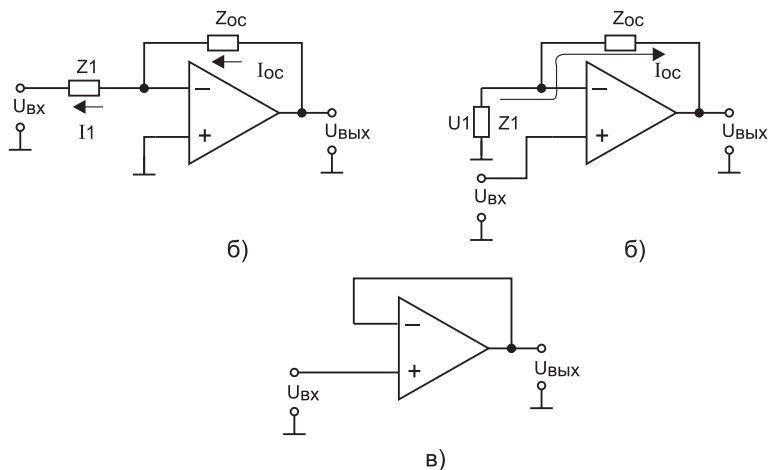


Рис. 50. Характерные схемы включения операционных усилителей с обратной связью: а — инвертирующий усилитель; б — неинвертирующий усилитель; в — повторитель напряжения

цепи обратной связи: $I_1 = I_{o.c.}$. Тогда для схемы инвертирующего усилителя (рис. 50а) получим

$$\frac{U_{вх}}{Z_1} = - \frac{U_{вых}}{Z_{o.c.}}$$

и коэффициент усиления

$$K_U = - \frac{Z_{o.c.}}{Z_1} .$$

Для неинвертирующего усилителя (рис. 50б)

$$\frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_{вых} - U_1}{Z_{oc}}$$

коэффициент усиления

$$K_U = \frac{Z_{oc}}{Z_1} ,$$

т. е. отличается по абсолютному значению от коэффициента усиления инвертирующего усилителя только на единицу.

Очевидно, что повторитель напряжения (рис. 50в) имеет коэффициент $K_U = 1$. Этот тип схемы называется буфером. Напряжение на его выходе совпадает по фазе с напряжением на входе.

Сопротивление Z имеет в общем случае комплексный характер, т. е. может содержать как активную, так и реактивную (емкостную) составляющую. Эти компоненты определяют не только значение коэффициента усиления (точнее, коэффициента передачи), но и изменение выходного напряжения во времени. Если сопротивления в цепи обратной связи и на входе чисто активные, то усилитель называют *пропорциональным*, или *масштабным*: его выходное напря-

жение изменяется пропорционально входному и одновременно с ним. На скачкообразный входной сигнал такой усилитель реагирует скачком напряжения на выходе (рис. 51а). Если в цепи обратной связи заменить резистор $R_{o.c.}$ конденсатором $C_{o.c.}$, то получим *интегрирующий* усилитель, или *интегратор* (рис. 51б): вследствие постепенного заряда емкости выходное напряжение будет непрерывно изменяться, пока напряжение на входе отличается от нуля. Если входной сигнал подавать длительно, напряжение на выходе усилителя может достигнуть максимального значения и сохраняться до тех пор, пока входной сигнал не изменит свой знак. Введением конденсатора во входную цепь получают *дифференцирующий* усилитель, или *дифференциатор*: выходное напряжение идеального дифференциатора пропорционально производной входного сигнала. В цепь обратной связи и на вход могут быть введены и нелинейные (например, диоды) и даже активные (например, транзисторы) элементы, обеспечивая построение компараторов, нуль-органов и т. п.

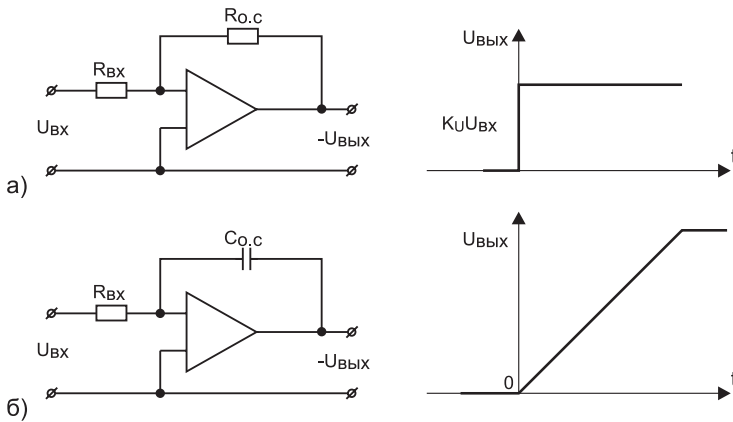


Рис. 51. Принципиальные схемы и реакция на скачкообразное изменение входного напряжения пропорционального (а) и интегрирующего (б) усилителей

Цифровая электроника выполняет более сложные операции с дискретными сигналами. Одним из базовых элементов цифровой схемотехники является *триггер*. Это устройство может неопределенно долго находиться в одном из двух устойчивых состояний (с 0 или 1 на выходе). Таким образом, триггер может служить элементом *памяти*, хранящем 1 бит информации, а n триггеров могут хранить n -разрядное двоичное *число (слово)*. Главная выходная линия Q имеет высокий уровень в состоянии 1 и низкий в состоянии 0 (положительная логика). На вторую выходную линию выводится, как правило, дополнение \bar{Q} . Существуют два типа триггеров: синхронизируемые (синхронные) и несинхронизируемые (асинхронные). У синхронного триггера по одной из входных линий поступают синхроимпульсы, позволяющие изменять состояние триггера только в определенные моменты времени. На рис. 52 показаны *асинхронные* RS-триггеры, выполненные на логических схемах, а также таблица истинности для них. Символ R обозначает сброс (от англ. reset), т. е. переход линии Q к состоянию 0, а символ S (от англ. set) — установку, т. е. переход линии Q к уровню 1; символ \bar{Q} означает дополнение Q .

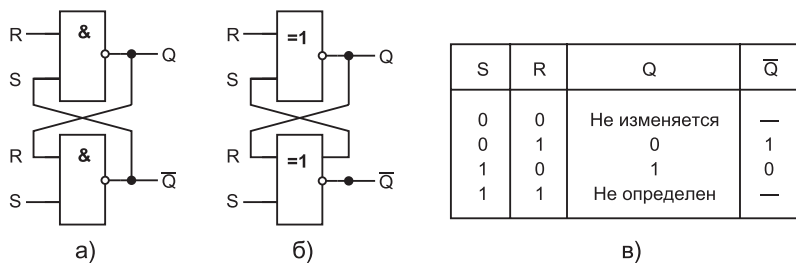


Рис. 52. RS-триггеры на двух логических элементах И-НЕ (а), ИЛИ-НЕ (б) и таблица истинности (в)

Как видно из таблицы истинности на рис. 52в (последняя строка), такой триггер имеет существенный недостаток: невозможно предсказать состояние, в котором он останется после подачи логической 1 на оба входа одновременно. Этого недостатка лишены синхронные триггеры, из которых наиболее часто встречается JK-триггер. Триггер имеет два синхронизируемых входа J и K, два прямых входа PR — (пред)установка и CLR — очистка (сброс), вход синхронизации CLOCK (иногда обозначается русской аббревиатурой СИ — синхроимпульс) и два дополняющих выхода. Входы J и K действуют аналогично входам S и R асинхронного RS-триггера, но только по разрешению синхроимпульса. D-триггер имеет два основных входа: D (от delay — задержка или data — данные) и CLOCK. Выходное состояние триггера может изменяться только в те моменты, когда меняется состояние сигнала синхронизации. Предусматриваются также вспомогательные входы для прямой установки PR или сброса CLR триггера (рис. 53). Этот триггер используется преимущественно как *однобитная защелка данных*. В ней состояние входа D передается на выход Q по нарастающему фронту сигнала синхронизации, а его спадающий фронт на выход воздействия не оказывает. Обычные D-триггеры синхронизируются нарастающим фронтом CLOCK, а JK-триггеры — спадающим фронтом.

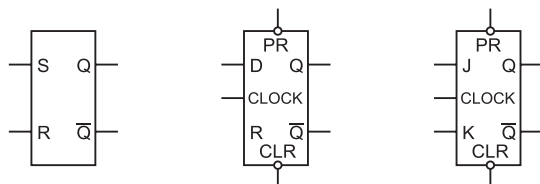


Рис. 53. Условные графические обозначения RS-, D- и JK-триггеров

Несколько триггеров, соединенных так, что цифровые данные можно сдвигать из данного разряда в соседний, называются *сдвиговым регистром*. Наиболее широко применяется регистр на JK-триггерах (рис. 54). Данные сдвигаются вправо по спадающему фронту каждого синхронизирующего сигнала, так что за три полных такта логический сигнал W передается со входа первого разряда на выход С последнего, в данном случае третьего, разряда. Аналогично тому, как в десятичной системе счисления можно умножать и делить числа на степень 10, сдвигая запятую, двоичные числа можно умножать и делить на степень 2 путем сдвига вправо или влево в регистре. Регистр по-

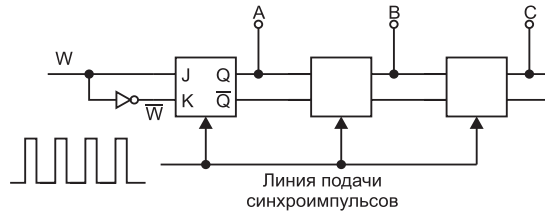


Рис. 54. Сдвиговый регистр и форма синхросигнала

звляет также преднамеренно задерживать информацию в зависимости от числа разрядов и частоты синхроимпульсов. Соединив выход сдвигового регистра со входом, получают устройство памяти с циркуляцией данных.

Триггеры, соединенные так, как показано на рис. 55, образуют двоичный *счетчик*. Если первоначально все триггеры были обнулены, то после подачи первого сигнала на выходе А первого справа триггера появится 1 и таким образом в устройство будет записано число СВА = 001, после второго 1 сдвинется на разряд влево и запишется число 010, после третьего 011 и т. д., а после восьмого СВА = 000. Такую схему называют счетчиком по модулю 8. В общем случае двоичный счетчик по модулю N сбрасывается на 0 после N-го импульса и имеет n разрядов и триггеров, так что $N = 2^n$. Например, счетчик из трех триггеров считает до $7 = 2^0 + 2^1 + 2^2$ (в двоичной системе 111) и сбрасывается 8-м импульсом, из четырех триггеров — считает до 15 и сбрасывается 16-м импульсом и т. д. Каждый из триггеров делит частоту входного сигнала пополам, и потому частота выходного сигнала будет равна $1/N$ частоты входного. Асинхронный счетчик (со сквозным переносом) осуществляет счет в том случае, когда изменения состояния на выходах триггеров происходят под действием заднего фронта синхроимпульсов и каждый триггер перебрасывается при переходе от 1 к 0. У синхронного счетчика все линии синхроимпульсов СИ соединены между собой, благодаря чему триггеры могут изменять свои состояния синхронно.

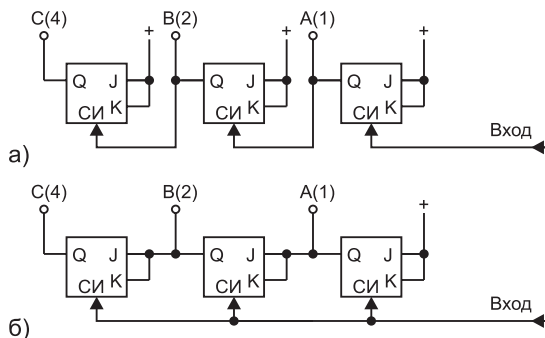


Рис. 55. Схема асинхронного (а) и синхронного (б) счетчиков

Таймер представляет собой источник импульсов с точно определенной длительностью и обеспечивает получение заданной выдержки времени. Микросхема таймера может вырабатывать как одиночный импульс заданной длительности (так называемая моностабильная схема, или схема с одним устой-

чивым состоянием), так и непрерывную последовательность импульсов. Типовые схемы таймеров (например, 555 серия) обычно сочетают в себе аналоговые и цифровые компоненты и времязадающие конденсаторы.

Цифровые данные можно перерабатывать в аналоговую форму и наоборот. В *цифроаналоговых преобразователях* (ЦАП) входным сигналом является двоичный код, выходным — напряжение или ток. Цифроаналоговое преобразование состоит в суммировании эталонных напряжений, соответствующих разрядам входного кода, и притом только тех, для которых в соответствующих разрядах стоит единица. Основными узлами преобразователя являются резистивная матрица, с помощью которой формируются эталонные токи, и токовые ключи (рис. 56). Сопротивления резисторов матрицы удваиваются при переходе от старшего разряда к младшему. Один из вариантов такой матрицы (со взвешенными резисторами) показан на рис. 56а. Здесь каждому разряду двоичного кода соответствует свое значение тока I_1, I_2, \dots, I_n , определяемое сопротивлением резисторов $R, 2R, \dots, 2^{n-1}R$. В варианте с резистивной сеткой $R-2R$ используются сопротивления только двух номиналов. Формирование токов происходит за счет как последовательных, так и параллельных цепей резисторов. Ключи строятся обычно на транзисторах.

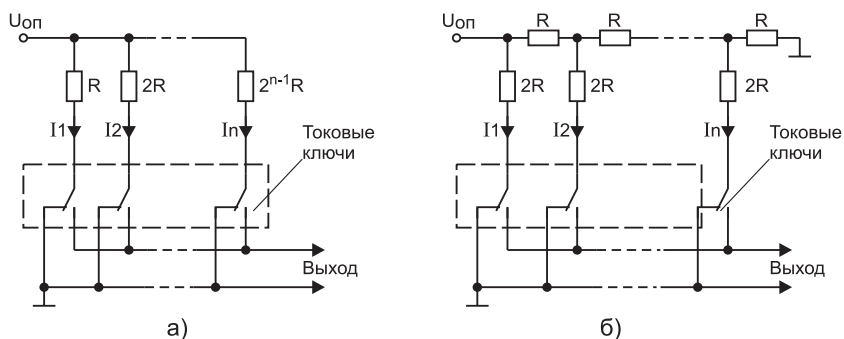


Рис. 56. Резистивные матрицы:

а — со взвешенными резисторами; б — с резистивной сеткой $R-2R$

В микроэлектронных *аналогоцифровых* преобразователях (АЦП) входным сигналом является напряжение, выходным — цифровой код. В преобразователях производится квантование входного напряжения на конечное число дискретных значений, каждое из которых преобразуется в код. Состав АЦП может изменяться в зависимости от метода преобразования и его реализации. Принцип действия АЦП последовательного приближения (поразрядного кодирования) состоит в сравнении эталонов напряжения, пропорциональных степеням числа 2, с аналоговой величиной. Если эталон больше входной величины, то в старшем разряде ставится 0. Затем производится сравнение со следующим по значению эталоном, и если он равен или меньше входной величины, то в старшем разряде выходного кода ставится 1 и в дальнейшем уравнивается разность между входной величиной и первым эталоном и т. д. В результате преобразования входное напряжение уравнивается суммой эталонных напряжений, снимаемых с ЦАП.

Принцип работы ЦАП последовательного счета основан на уравнивании входной величины суммой одинаковых и минимальных по значению эталонов. Момент уравнивания определяется компаратором, а количество слагаемых подсчитывается счетчиком. Принцип работы преобразователей параллельного действия основан на одновременном сравнении входного сигнала с $2^n - 1$ эталонами, соответствующими n -разрядному двоичному коду, и кодировании результатов. Такие преобразователи являются наиболее быстродействующими, но требуют большого количества компараторов. Поэтому иногда применяют комбинированное устройство: несколько малоразрядных АЦП параллельного действия соединяют последовательно.

4.4. Статические реле

4.4.1. Промежуточные реле и реле времени. В серии промежуточных реле с включающей и удерживающей катушками реле РП16, 17 — электромеханические, реле типа РП18 имеют полупроводниковый блок замедления. Для уменьшения времени срабатывания реле РП17 последовательно с включающей обмоткой введен добавочный резистор. Все реле серии выпускаются на постоянный и переменный ток, номинальное напряжение от 24 до 220 В постоянного и от 110 до 220 В переменного тока, отключаемый ток соответственно от 2,65 до 0,21 А (постоянный) и 5 А (переменный) для реле РП16, РП18 и от 1,9 до 0,12 А (постоянный) и 2—1,25 А (переменный) — для реле РП17; постоянная времени цепи нагрузки $\leq 0,02$ с, коэффициент мощности $\geq 0,5$; номинальный ток контактов 5 (РП16, 17) и 2 А (РП18).

Реле РП18 имеют блоки замедления при срабатывании и возврате (рис. 57).

При подаче напряжения начинается заряд конденсатора С1 через резистор R1, а на базе транзистора VT1 устанавливается напряжение, определяемое положением движка резистора R2 (рис. 57а). Когда напряжение на конденсаторе превысит это значение, транзистор VT1 отпирается, разрядным током конденсатора отпирается и транзистор VT2, что приводит к срабатыванию выходного реле K1. Время замедления на срабатывание регулируется резистором R1. После срабатывания реле удерживается во включенном положении, получая питание через цепь своего замыкающего контакта.

В блоке замедления при возврате (рис. 57б) реле срабатывает под действием включающей обмотки K1.2, которая получает питание при подаче напряжения на схему через размыкающий контакт K1 и транзистор VT3. Последний открывается током заряда конденсатора С4 и закрывается при его разряде. Вместе с тем происходит заряд конденсаторов С1 и С2. Якорь реле остается в притянутом положении благодаря остаточной намагниченности сердечника и подпитке обмотки K1.2 через резистор R6. При снятии напряжения или уменьшении его ниже напряжения возврата реле конденсатор С2 начинает разряжаться на резистор R2, и запирающее напряжение на входе транзисторного ключа VT1 снижается. Ключ открывается, и током разряда конденсатора С1 открывается транзистор VT2. Конденсатор С3 разряжается на обмотку K1.1, а, так как ее магнитодвижущая сила оказывается при этом противоположной по знаку МДС включения, сердечник размагничивается и якорь реле отпадает.

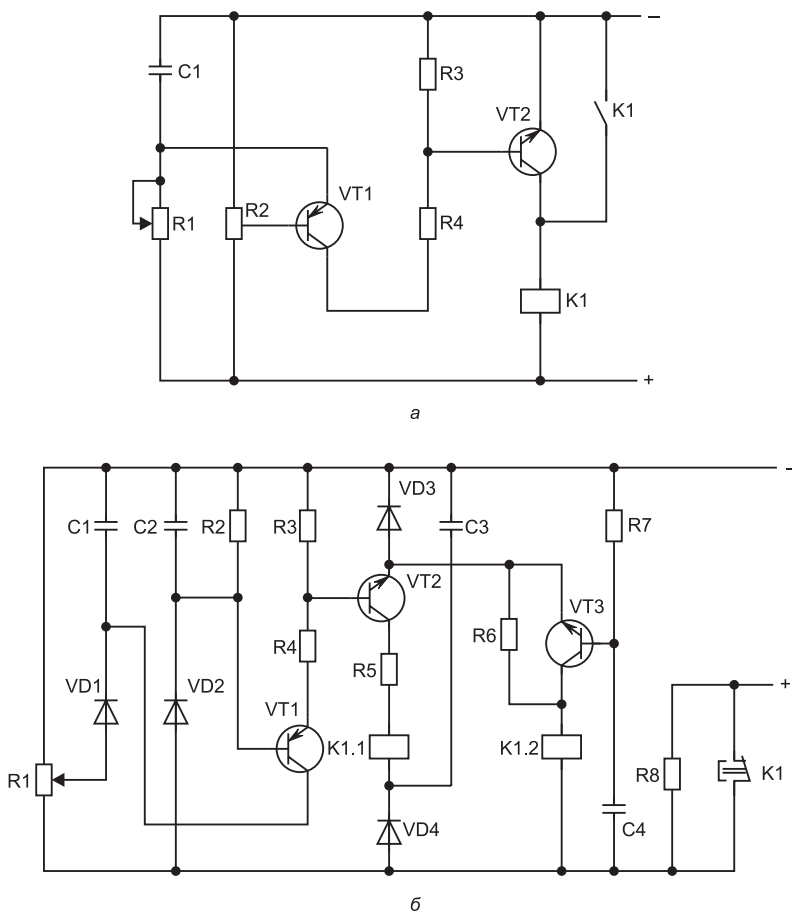


Рис. 57. Упрощенные принципиальные схемы блоков замедления реле РП18: при срабатывании (а) и возврате (б)

Реле времени РВ01 выпускаются на напряжение постоянного тока от 24 до 220 В, переменного — от 100 до 380 В. Мощность, потребляемая реле, до 10 Вт на постоянном и до 20 В · А на переменном токе, диапазон уставок по времени — от 0,1 до 50,0 с. Длительно допустимый ток контактов — 2,5 А, кратковременно допускается больший ток. Принципиальная схема реле приведена на рис. 58. При подаче напряжения на реле срабатывает пороговый элемент ТН, разрешающий работу счетчика СТ. По истечении выдержки времени, задаваемой конденсатором С1 и элементом ДТ и определяющей минимальную уставку, начинает работать генератор G импульсов стабильной частоты, заполняющих счетчик СТ. При совпадении количества этих импульсов с числом, набранным переключателями SB1—SB9, открывается транзистор VT1 и запрещает дальнейшую работу генератора. Одновременно открывается транзистор VT2 и срабатывает реле К1. Таким образом, выдержка времени на срабатывание реле определяется числом импульсов N, отсчитанных счетчиком, и начальной (минимальной) уставкой T_{мин}, т. е. T_{ср} = T_{мин} + T_N, где T_N — время отсчета N импульсов; T_{мин} = 0,1 с.

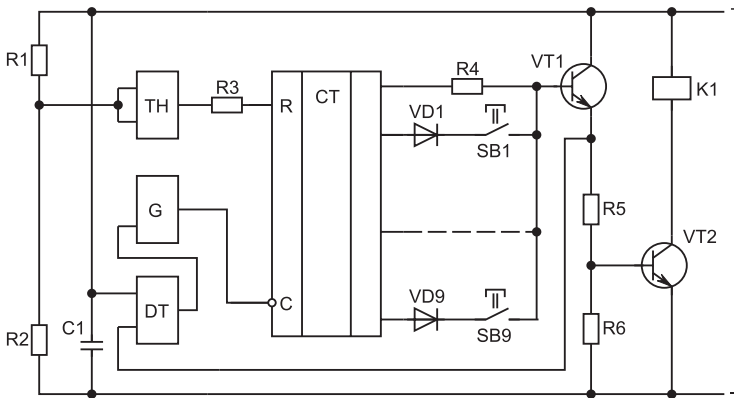


Рис. 58. Принципиальная схема реле времени PB01 (упрощенная)

Реле *PB03* обеспечивает выдержку времени на возврат. Номинальное напряжение — от 100 до 380 В переменного тока, выдержка времени — от 0,15 до 20,0 с; потребляемая мощность 3 В · А, коммутационная способность контактов та же, что и у реле *PB01*. Реле содержит две одинаковые схемы задержки, подобные изображенной на рис. 59. Последняя состоит из времязадающего контура *R1—R2—C1, порогового устройства на транзисторе VT1, выходного каскада на транзисторе VT2, конденсатора памяти C2, накопительного конденсатора C3 и реле с магнитной памятью K1. Когда на схему подается напряжение (выпрямленное), через резистор R5 и контакт K1.1 получает питание обмотка реле K1, которое срабатывает, размыкая контакт K1.1, и остается в этом положении за счет магнитной памяти и подпитки через конденсатор C3; заряжается конденсатор C1. Все транзисторы запираются, и в дальнейшем при наличии питания состояние элементов схемы не изменяется.

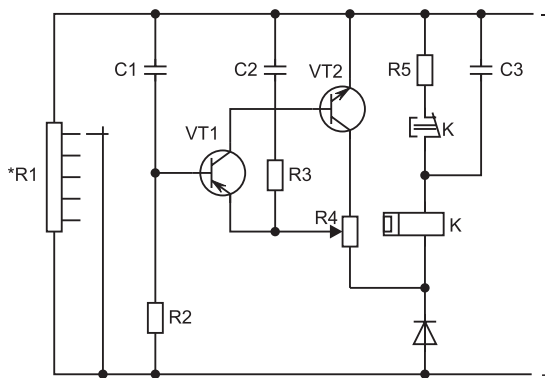


Рис. 59. К принципу работы схемы выдержки времени на возврат реле *PB03*

Когда напряжение на схеме отключается или становится ниже напряжения возврата реле, конденсатор C1 начинает разряжаться на блок резисторов *R1, суммарное сопротивление которых выбирается установкой переключателей (на схеме не показаны). По мере разряда конденсатора C1 в определенный момент транзистор VT1 переходит в режим насыщения, током разряда кон-

денсатора С2 открывается транзистор VT2, и конденсатор С3 разряжается на обмотку реле К1. Поскольку полярность разрядного тока противоположна полярности тока срабатывания реле К1, а создаваемая им МДС противоположна МДС постоянного магнита, якорь реле отпадает и размыкающие контакты его замыкаются. Точно так же работает и второе реле (К2), а возврат третьего реле (К3) происходит без выдержки времени при снижении напряжения до 10—55 % номинального.

Реле времени РСВ13 применяется в схемах РЗА на переменном оперативном токе. Реле имеет две выходные цепи с «проскальзывающими» контактами (время замкнутого состояния 0,4 с) уставок Т1 и Т2 и одну — с конечным замыкающим контактом уставки Т3. Диапазон регулирования уставок по времени 0,1—9,9 с дискретно с интервалом 0,1 с. Значения уставок должны удовлетворять условию $T1 < T2 < T3$ и различаться не менее чем на 0,4 с. Длительно допустимый ток контактов — 5 А.

Реле состоит из двух насыщающихся трансформаторов на входе, электронной схемы и трех выходных электромагнитных реле. Первичные обмотки насыщающихся трансформаторов включаются во вторичные цепи измерительных трансформаторов тока. Электронная схема запускается контактами других реле. Принцип действия ее основан на сравнении числа импульсов тактового генератора с заданным; структурная схема представлена на рис. 60.

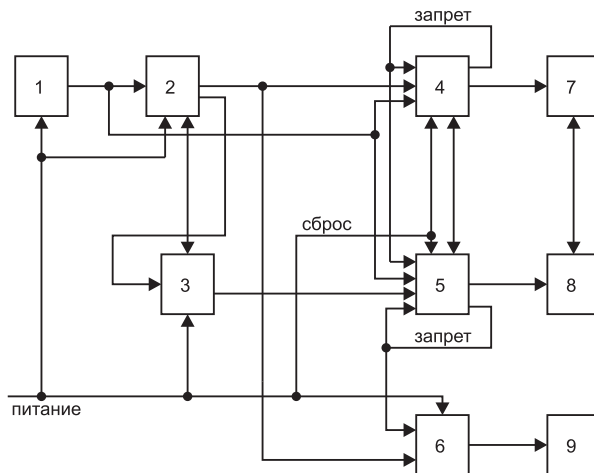


Рис. 60. Структурная схема электронной части реле РСВ13: 1 — генератор тактовых импульсов; 2, 3 — счетчики импульсов; 4, 5 — формирователи длительности замкнутого положения «проскальзывающих» контактов; 6 — формирователь однократного включения конечного контакта; 7, 8, 9 — усилители и выходные реле К1, К2 и К3 (цепи питания элементов схемы не показаны)

При пуске реле нулевой разрешающий сигнал подается на входы элементов 1—6. Один из входов цифровой микросхемы, на которой собран генератор 1, используется для блокировки последнего и установки его в исходное состояние. Прямоугольные импульсы выхода микросхемы поступают на входы счетчика 2 и формирователей 4 и 5, а импульсы переноса с выхода счетчика 2 — на вход счетчика 3. Выходы счетчиков через переключатели уставок

(на схеме рис. 60 не показаны) соединены с входами формирователей 4, 5, 6. Задание уставок осуществляется по методу суммирования интервалов. В целях снижения потребляемой мощности предусмотрена определенная последовательность срабатывания выходных реле. Для реализации этой последовательности и функционирования временно замыкающего контакта в схему введены блоки 4 и 5 формирования длительности положения после срабатывания реле К1, К2 и блок 6 однократного срабатывания реле К3, выполненные на микросхеме счетчика, RS-триггерах и логических элементах.

После пуска реле через замкнутые переключатели уставок и выходы счетчика на вход формирователя 4 поступает сигнал, устанавливающий его в нулевое положение. Через промежуток времени, соответствующий набранному на переключателе уставок значению, на соответствующих выходах счетчиков 2 и 3 появляются сигналы «1», в результате чего срабатывает реле К1 (блок 7) и одновременно разрешается счет импульсов счетчиком формирователя 4. После набора заданного числа импульсов, соответствующего промежутку времени 0,4 с, на выходе счетчика появляется сигнал, который блокирует дальнейший счет импульсов и возвращает реле в исходное положение.

Формирование длительности положения после срабатывания К2 (блок 8) происходит аналогично. При этом возможны два случая: первый — когда реле срабатывает с выдержкой времени T_2 , второй — с выдержкой времени $T_1 + 0,4$ с. Таким образом обеспечивается требуемая последовательность работы реле К1 и К2 независимо от набранных переключателями уставок.

Посредством блока 6 могут быть реализованы два варианта однократного срабатывания реле К3: первый — с выдержкой времени T_3 , второй — через промежуток времени $t = T_2 + 0,4$ с (при $T_2 > T_1 + 0,4$ с) или $t = T_1 + 0,4$ с (при $T_2 < T_1 + 0,4$ с). Однократность срабатывания обеспечивается приданием триггерной характеристики счетчику формирователя 5. В обоих случаях осуществляется требуемая последовательность работы всех трех реле.

Реле времени РСВ14 выпускаются на напряжение от 24 до 220 В постоянно и от 100 до 220 В переменного тока. Потребляемая мощность — до 15 Вт на постоянном и до 30 В · А на переменном токе. Реле имеет три независимые выходные цепи: мгновенный переключающий контакт, «проскальзывающий» контакт с выдержкой времени на срабатывание и конечный замыкающий контакт также с выдержкой времени на срабатывание. Уставка выдержки времени выбирается в одном из четырех диапазонов от 0,05 до 90,0 с, регулируется ступенями внутри диапазона, и плавно — внутри ступени. Время замкнутого положения проскальзывающего контакта можно изменять от 0,3 до 0,9 с. Длительно допустимый ток контактов 2,5 А.

Функциональные узлы реле представлены на структурной схеме рис. 61.

При подаче на реле напряжения (блок 1) срабатывает схема пуска 2, сигнал «0» на ее выходе разрешает работу генераторов 3 и 4 (микросхемы) и начинается отсчет времени. Одновременно схема пуска действует на блок 5, который без выдержки времени включает реле К1. После заполнения счетчика заданным количеством импульсов на выходе микросхемы генератора с делителем частоты 3 цепи временно замыкающего контакта К2 появляется сигнал логической 1, в результате чего срабатывает реле К2. Одновременно начинается заряд конденсатора в схеме управления 5, срабатывает пороговое устройст-

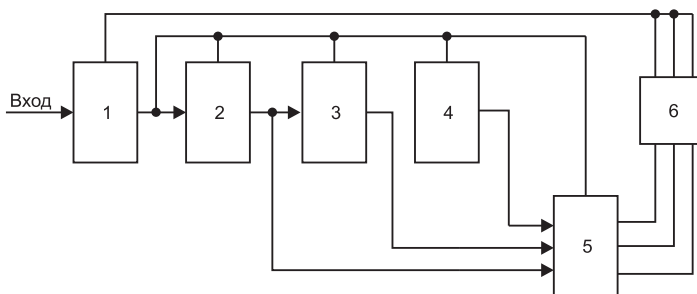


Рис. 61. Структурная схема реле времени типа PCB14: 1 — блок питания и управления схемой реле; 2 — схема запуска; 3, 4 — генераторы с переключателями уставок выдержки времени и делителями частоты; 5 — схема управления исполнительным органом 6 с реле K1, K2 и K3

во и на выходе его появляется логический 0, вследствие чего якорь реле K2 отпадает. Время замкнутого положения контакта определяется при этом постоянной времени цепи заряда конденсатора, и его можно регулировать изменением сопротивления этой цепи.

Генератор и делитель частоты 4 замыкающего контакта K3 работает аналогично блоку 3, а управление этим контактом осуществляется так же, как и контактом реле K1.

Выпускаются и реле времени с определенным целевым назначением. Так, электронное *реле времени «Старт»* (НПФ «Альянс-Электро»), предназначенное для работы в схемах автоматики (АВР, АПВ и пр.), осуществляет контроль наличия напряжения в электрических цепях и их соответствующее переключение при его исчезновении по истечении заданной выдержки времени от 1 до 40 с. Реле отличается высокой точностью отсчета временных интервалов благодаря применению генератора базовых импульсов с кварцевой стабилизацией частоты. Максимально допустимая мощность нагрузки — 4 кВт.

4.4.2. Реле тока и напряжения.

Реле максимального тока РСТ11—РСТ14 предназначены для работы в цепях постоянного и переменного оперативного тока напряжением 220 В. Отсутствие оперативного напряжения приводит к отказу реле. Диапазон уставок по току для каждого типа реле составляет 1 : 4 в пределах от 0,05 до 120 А для всей серии. Отключающая способность контактов выходного реле не более 1 А в цепях постоянного и не более 2 А в цепях переменного тока.

Принцип работы схемы реле поясняется на рис. 62.

Входной сигнал воспринимается промежуточным трансформатором и после выпрямителя (на схеме не показаны) поступает на вход схемы сравнения, содержащей пороговый элемент на операционном усилителе (DA1) и триггер Шмитта (DA2). Порог компаратора DA1 определяется напряжением на блоке резисторов *R2, сопротивление которого можно изменять ступенями с помощью переключателей уставок (на рис. 62 не показаны). Для плавной подстройки уставки служит резистор R1.

При отсутствии входного сигнала напряжение на выходе компаратора DA1 имеет максимальное положительное значение, до которого и заряжается кон-

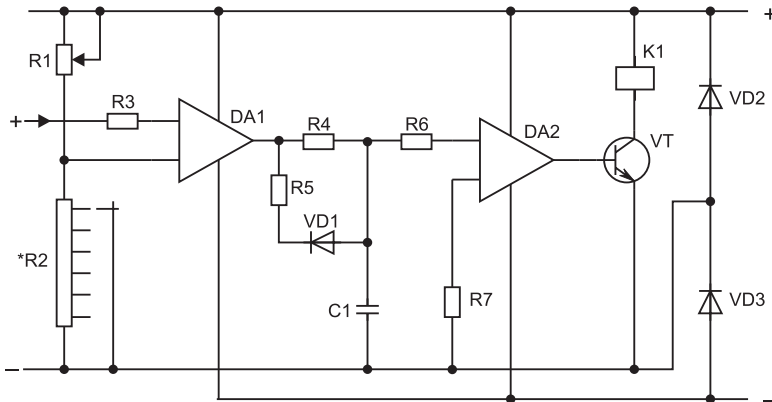


Рис. 62. К принципу работы реле PCT11—PCT14

денсатор $C1$. При появлении на входе сигнала, превышающего порог компаратора, напряжение на выходе его меняет знак, и конденсатор $C1$ перезаряжается. Параметры цепи заряда—разряда выбраны таким образом, что с ростом амплитуды входного тока отрицательное напряжение на конденсаторе увеличивается, а положительное — уменьшается. При токе срабатывания реле отрицательное напряжение на конденсаторе достигает порога срабатывания триггера Шмитта, компаратор DA2 переключается и напряжение на его выходе становится положительным, вследствие чего открывается транзистор VT1 и срабатывает выходное реле K1.

Реле переменного напряжения PCH14—PCH17. Принципиальные схемы этих реле существенно не отличаются от описанного выше (рис. 62). Полный диапазон уставок по напряжению — от 12 до 400 В, потребляемая мощность — от 0,1 до $0,9 \text{ В} \cdot \text{А}$. Реле PCH15, PCH17 работают на оперативном напряжении переменного тока, реле PCH14, PCH16 — на постоянном напряжении. Реле минимального напряжения PCH16 и PCH17 отличаются по схеме от реле максимального напряжения полярностью включения операционного усилителя DA1.

Реле постоянного напряжения PCH11, PCH12 и PCH18. Реле серии PCH11 предназначены для применения в схемах контроля изоляции цепей постоянного тока напряжением 220 В, PCH12 — для контроля повышения уровня напряжения, а PCH18 — для контроля понижения напряжения в цепях постоянного тока напряжением 220 В. Оперативное напряжение реле PCH11 — 220 В переменного тока, для схем реле PCH12 и PCH18 оперативное напряжение не требуется. Диапазон изменения уставок реле PCH12 и PCH18 от 180 до 245 В ступенями не менее 5 В, реле PCH11 — от 1,4 до 32 В. Мощность, потребляемая реле при срабатывании, не превышает 6,5 Вт ($6,5 \text{ В} \cdot \text{А}$). Реле PCH11 имеет один замыкающий контакт, PCH12 и PCH18 — один замыкающий и один размыкающий контакты.

Реагирующий орган реле — двухполярного действия, выполнен на двух операционных усилителях с пороговой характеристикой, между которыми включен выпрямительный мост. При малом входном сигнале выходное напряжение первого усилителя близко к нулю, выпрямительный мост открыт и

на выходе второго усилителя удерживается высокое отрицательное напряжение. При увеличении входного напряжения любой полярности напряжение на выходе первого усилителя резко возрастает, и на выходе моста появляется положительное напряжение, переключающее второй усилитель. Высокое положительное напряжение на выходе открывает транзисторный ключ, в коллекторную цепь которого включено исполнительное электромеханическое реле. Ступенчатое регулирование уставок реле производится с помощью делителя напряжения на входе реагирующего органа, плавное — переменным резистором на входе операционного усилителя.

Схема реле РСН12 и РСН18 построена на операционном усилителе, работающем в режиме компаратора. Порог переключения компаратора задается опорным напряжением, снимаемым с резисторного делителя. Когда напряжение на входе реле меньше уставки, входное напряжение компаратора меньше опорного, а выходное не превышает 1 В. С увеличением входного напряжения до значения, при котором входное напряжение превысит опорное, компаратор переключается, и на его выходе появляется высокий положительный потенциал. Выходным напряжением компаратора открывается транзистор с обмоткой электромеханического реле в цепи коллектора, которое при этом срабатывает.

4.3.2. Реле тока дифференциальное РСТ15.

Реле РСТ15 используется в качестве чувствительного органа дифференциальных защит. Номинальный переменный ток — 1 (5) А, оперативное напряжение — постоянное 220 В. Реле отстроено от бросков тока намагничивания с апериодической составляющей и от бросков тока с амплитудой, в несколько раз (до 6,6) превышающей амплитуду синусоидального тока срабатывания. Мощность, потребляемая цепью контроля, 2 В · А на фазу, цепью оперативного напряжения — не более 7 Вт. Реле имеет один замыкающий контакт. Длительно допустимый ток первичной обмотки — до 10 А, уравнивательной — 5 А, контактов — 2,5 А.

Выше отмечалось, что дифференциальная защита должна быть отстроена от бросков намагничивающего тока (БНТ) в индуктивных элементах первичной цепи, особенно в трансформаторах. В схеме реле РСТ15 (рис. 63а) блокировка от БНТ достигается применением трансреактора (трансформатора с воздушным зазором) ТАУ и двухполупериодного выпрямительного моста на диодах VD1—VD2. Трансреактор по своим динамическим характеристикам близок к дифференцирующему звену, т. е. напряжение на его вторичной обмотке пропорционально производной от тока в цепи его первичных (основной и уравнивательных) обмоток. Это означает, что трансреактор передает без искажений синусоидальные составляющие (из которых в БНТ наиболее выражены первая 50 Гц и вторая гармоники), подавляет апериодическую и не пропускает постоянную составляющую. Выпрямленное напряжение подается на активный фильтр Z, состоящий из пассивной RC-цепи и операционного усилителя. Конфигурация RC-цепи и параметры фильтра выбраны таким образом, что он усиливает первую гармонику (в 2,2 раза), ослабляет вторую (в 3 раза) и пропускает без изменения постоянную составляющую (рис. 63б). Установлено, что таким путем обеспечивается отстройка реле от переходных

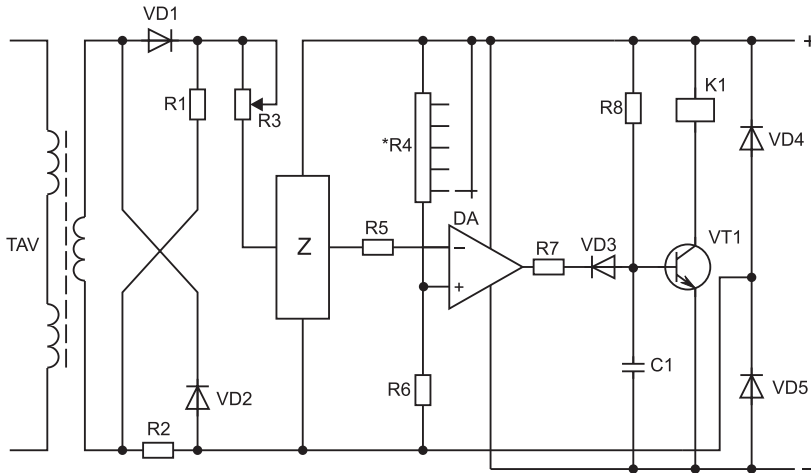


Рис. 63. Упрощенная принципиальная схема дифференциального реле тока

токов небаланса и БНТ при токе срабатывания защиты не менее $0,5I_{\text{ном}}$; чувствительность реле к броску тока намагничивания резко снижена.

С фильтра сигнал поступает на одноходовый компаратор, собранный на операционном усилителе DA, и далее в схему временной задержки на срабатывание R8-C1. Порог срабатывания компаратора, а следовательно, и уставка реле задается резисторами *R4. Когда входной сигнал отсутствует, напряжение на выходе DA и конденсаторе C составляет примерно $-13-14$ В. При срабатывании компаратора напряжение на его выходе скачком изменяется на $+13-14$ В, диод VD3 закрывается, и конденсатор C начинает перезаряжаться. Когда напряжение на нем превысит смещение на базе транзистора, VT1 откроется, и сработает выходное реле K1. Но если до этого момента компаратор возвратится в исходное положение, то конденсатор быстро разрядится через резистор R7, и транзистор не откроется.

При БНТ компаратор успевает возвращаться каждый период основной гармонической тока, так что транзистор не открывается и реле не срабатывает. Транзистор открывается только при условии, что непрерывный сигнал от компаратора поступает в течение времени не менее одного периода (здесь 22 мс). Это условие выполняется при КЗ в зоне защиты, когда основная синусоидальная составляющая дифференциального тока достаточно велика и постоянная составляющая выпрямленного напряжения вызывает устойчивое срабатывание компаратора и выходного реле; чувствительность реле в этом случае максимальна.

4.3.3. Реле напряжения обратной последовательности РСН13-1.

Реле предназначено для использования в качестве реагирующего органа в схемах защиты от несимметричных КЗ, а также для сигнализации при их возникновении. Контролируемая величина — трехфазное линейное напряжение 100 В, оперативное напряжение — 100 В постоянного тока. Диапазон регулирования уставок от 6 до 24,6 В (линейное напряжение обратной последова-

тельности), потребляемая мощность по цепи контроля $0,8 \text{ В} \cdot \text{А}$ (на фазу), оперативных цепей — до 7 Вт. Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты на ток до 2,5 А.

Схема реле содержит на входе пассивный RC-фильтр напряжения обратной последовательности (см. выше). Реагирующий орган содержит два операционных усилителя, включенных по схеме двухвходового компаратора. Первый из них задает уставку реле, а второй совместно с времязадающей цепью сглаживает пульсации сигнала, подаваемого на исполнительный орган. Когда напряжение на выходе фильтра превышает порог срабатывания реагирующего органа, компараторы переключаются и срабатывают транзисторный ключ и выходное электромеханическое реле.

4.3.4. Реле направления мощности РСМ13.

Реле предназначено для использования в РЗиА в качестве органа, реагирующего на значение и направление мощности. Номинальное контролируемое напряжение — 100 В, оперативное постоянное 220 В. Диапазон изменения уставок от 2 до 500 Вт. Потребляемая мощность по цепям тока и напряжения порядка $1 \text{ В} \cdot \text{А}$, по оперативной цепи 20 Вт.

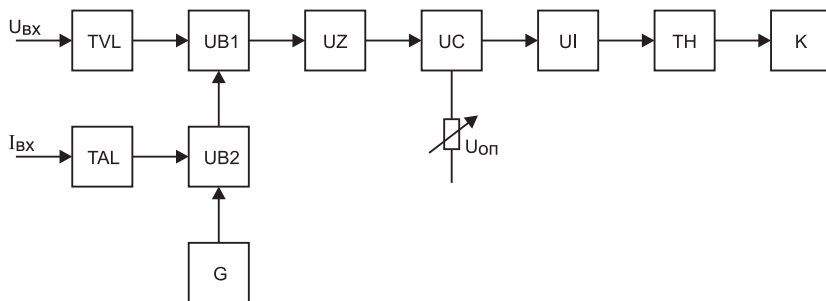


Рис. 64. Структурная схема реле РСМ13

Реле имеет один замыкающий и один размыкающий контакты на ток до 1 А (постоянный) или до 2 А (переменный). Промежуточные трансформаторы TVL и TAL преобразуют входные напряжение и ток реле в пропорциональные им напряжения. Амплитудно-импульсный модулятор UB1 и фильтр нижних частот UZ образуют время-импульсный множитель аналоговых сигналов. На один вход широтно-импульсного модулятора UB2 подается напряжение с выхода трансформатора TAL, а на другой его вход — пилообразное напряжение генератора G. На выходе UB2 образуются прямоугольные импульсы, длительность каждого из которых определяется мгновенным значением входного тока реле. На один вход амплитудно-импульсного модулятора UB1 поступает напряжение с выхода UB2, на другой — с выхода трансформатора TVL. На выходе UB1 формируется импульсное напряжение, длительность каждого импульса которого пропорциональна мгновенному значению тока, амплитуда — мгновенному значению напряжения, а площадь — мгновенному значению полной мощности на входе реле. Постоянная составляющая этого напряжения, пропорциональная активной мощности на входе реле, выделяется фильтром низких частот UZ и сравнивается с опорным напряжением на компарато-

ре УС. Компаратор выполнен таким образом, что в момент, когда входная мощность реле равна уставке, длительность импульсов выходного сигнала компаратора равна длительности пауз между ними. Выходное напряжение интегратора UI равно при этом нулю, а в общем случае полярность его зависит от знака разности длительностей импульсов и пауз. Это напряжение после порогового элемента ТН поступает на реле К, которое срабатывает при одной полярности напряжения и возвращается при обратной.

4.3.5. Реле контроля напряжения и угла сдвига фаз РСНФ-12.

Реле осуществляет контроль наличия напряжения на линии (U_L) и шинах (U_B) и угла сдвига фаз этих напряжений. Применяется в схемах автоматического повторного включения и синхронизации. Канал сравнения угла сдвига фаз между напряжениями U_L , U_B с заданным значением угла имеет дискретную (через 2°) шкалу уставок от 4 до 90° . Канал дает разрешение на включение выключателя синхронизации при наличии напряжения на двух входах и при условии, что угол между ними равен или меньше угла уставки.

Канал измерения напряжения на линии имеет постоянную уставку 50% , канал измерения напряжения на шинах — 85% номинального напряжения. Имеются также каналы контроля исправности отдельных цепей и др. Номинальное напряжение от шин и линии — однофазное, до 100 В , длительно допустимый ток контактов 2 А . Основная часть структурной схемы реле воспроизведена на рис. 65.

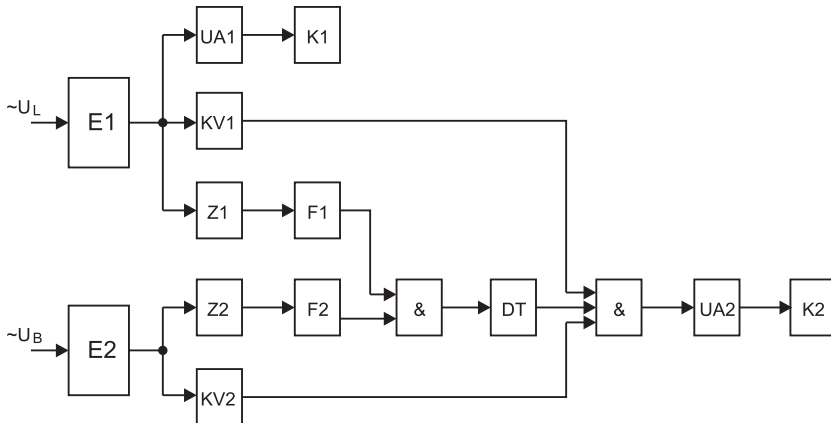


Рис. 65. Фрагмент структурной схемы реле РСНФ-12

Напряжения линии U_L и шин U_B подаются на изоляционно-согласующие элементы E1 и E2 с трансформатором на входе и компаратором на выходе каждого из них. На один из входов компаратора подано фиксированное напряжение уставки. Если напряжение линии меньше $0,5U_H$, то на выходе усилителя UA1 появляется напряжение, срабатывает реле K1 и подается сигнал «Отсутствие напряжения линии». Если напряжение на шинах больше $0,85U_H$, то на выходе релейного элемента KV2 появляется сигнал, разрешающий действие логического элемента «И» в схеме определения угла фазового сдвига напряжений. Фильтры низких частот Z1, Z2 питают формирователи-ограничи-

тели F1, F2. При прохождении отрицательной полуволны измеряемого напряжения на входе ограничителей формируются стандартные прямоугольные импульсы напряжения, которые логически суммируются по «И» на входе схемы задержки на срабатывание ДТ. Время задержки определяет допустимый угол сдвига фаз, при котором сигнал успевает проходить на схему «И». Последняя обеспечивает срабатывание выходного органа (усилителя) UA2 и реле К2 при наличии напряжения линии и шин, значения которого превышают соответственно 50 и 85 % номинального, и при угле сдвига фаз не более допустимого. При расхождении векторов напряжения линии и шин элемент времени ДТ возвращается в положение до срабатывания и далее срабатывать не успевает, так как необходимое для этого время превышает длительность периода. Реле К2 возвращается и появляется сигнал «Неисправность».

При несинхронном режиме напряжение линии с некоторой частотой скольжения смещается относительно напряжения шин, так что положения допустимого и недопустимого сдвига фаз чередуются. Если скольжение велико, реле К2 не работает. При определенном снижении скольжения выдержка времени элемента ДТ становится достаточной, и реле К2 периодически срабатывает, переключая сигналы «Срабатывание реле сдвига фаз» и «Неисправность».

При отключении выключателя линии синхронизм, как правило, утрачивается, а иногда исчезает напряжение на линии. Вне зависимости от этого сигнал «Неисправность» не появляется, реле К1 и К2 не блокируются, при необходимости работает АПВ линии.

4.5. Релейная защита на базе микропроцессорных устройств

4.5.1. Общие сведения.

В настоящее время получают широкое распространение устройства РЗиА на базе микропроцессоров — управляемых «сверхбольших» интегральных схем. Такие защиты реализуются уже не на дискретных релейных элементах, а в виде программ, закладываемых в память микро-ЭВМ или микропроцессорных систем.

Применение микропроцессорной техники для устройств РЗиА началось в 90-х гг. XX в. Первые контроллеры были созданы «Шнайдер Групп», АВВ и другими ведущими фирмами-производителями электротехнического оборудования. Создание РЗиА на базе микропроцессоров произошло в связи с существенным снижением стоимости компонентов микропроцессорной техники и успешным внедрением их в различные виды промышленного электрооборудования.

Микропроцессорные устройства РЗиА имеют серьезные преимущества перед аппаратурой на электромеханических или электронных реле:

1. Повышенная надежность, которая обеспечивается высокой степенью интеграции применяемых микросхем.
2. Возможность полной самодиагностики устройства.

3. Реализация сложных алгоритмов работы РЗА программным способом с возможностью корректировки и без привлечения дополнительного оборудования.

4. Программная перестройка параметров (уставок, характеристик) срабатывания защиты при изменении конфигурации сети, а также дистанционно с компьютера верхнего уровня.

5. Значительно меньшие габариты и масса в сравнении с устройствами РЗА на основе отдельных электромеханических или статических (электронных) реле.

6. Большой объем, универсальность и возможность длительного хранения информации об аварийных процессах в защищаемых сетях, о расходе электроэнергии, работе электрооборудования распределительных устройств и пр.

7. Универсальность аппаратного исполнения для различных видов защит.

В итоге применение микропроцессорных устройств РЗА существенно повышает бесперебойность электроснабжения потребителей и уменьшает последствия аварий электроустановок.

4.5.2. Принципы построения микропроцессорных устройств.

4.5.2.1. Микропроцессор. Основным узлом микропроцессорных устройств является микропроцессорный комплект или микро-ЭВМ, а его «мозгом» — собственно микропроцессор. В любом микропроцессоре имеются четыре основных элемента: устройство управления, арифметико-логическое устройство, память и устройство ввода-вывода.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) по командам *устройства управления* выполняет арифметические и логические операции над данными, поступающими из устройств памяти или ввода-вывода. Оба устройства, скомпонованные на одной интегральной схеме, образуют центральный процессор (ЦП), выполняющий все функции управления и обработки данных.

Устройства ввода-вывода (УВВ) обеспечивают связь ЦП с внешними, или периферийными, устройствами.

Устройство памяти, или запоминающее устройство (ЗУ) — это место хранения программ и данных.

ЦП связывается со всеми устройствами либо посредством памяти, либо через общие шины. Физически шины представляют собой печатные проводники или кабели, к которым подключаются все блоки системы. Однонаправленная *адресная шина* дает возможность выбирать информацию или блок, двунаправленная *шина данных* — передавать ее в виде команд, адресов и данных. Все операции инициируются центральным процессором. Программа и данные представляются в двоичной форме, называемой *машинным кодом*.

Минимальное количество информации — один разряд двоичного числа называют *бит* (от англ. binary digit — бинарная цифра), последовательность бит образует *слово*. Запись десятичных цифр и алфавитных символов в виде двоичных слов называют *кодированием*. Слова хранятся в специальных блоках — регистрах, представляющих собой набор триггеров, обычно D-типа. По существу, весь центральный процессор представляет собой набор различных регистров.

Устройство управления содержит два регистра — регистр команд и программный счетчик — и логические схемы для декодирования команд. Назначение регистра команд — сохранять текущее слово команды, согласно которой процессор действует в данный момент. Функции программного счетчика заключаются в том, чтобы образовывать слово, представляющее в памяти адрес следующей команды. Устройство непрерывно осуществляет поочередное извлечение команд из памяти и их исполнение, пока не будет достигнут конец программы.

АЛУ представляет собой сложную двухвходовую схему, комбинация сигналов на входе которой однозначно определяет сигнал на выходе. Схема состоит только из логических элементов, и поэтому быстродействие ее ограничивается лишь временем прохождения сигнала от входа к выходу (порядка наносекунд). Основные арифметические операции, выполняемые в АЛУ, это сложение и вычитание. АЛУ взаимодействует со специальным регистром, который называется аккумулятором и хранит одно слово двоичной информации, например одно из слагаемых или результат операции. Сдвиг двоичного числа в аккумуляторе на одну позицию влево приводит к его удвоению, вправо — делит его пополам (подобно умножению или делению на 10 при сдвиге на один разряд в десятичной системе). Операции сдвига широко используются в подпрограммах умножения, деления и др.

Устройство памяти. Память состоит из элементарных ячеек, организованных в некий массив. Каждый элемент памяти — это обычный RS-триггер, способный хранить один бит информации. Группа из восьми битов, обрабатываемая как единое целое (слово), называется *байт*, а $1024 (2^{10})$ байта — килобайт, Кбайт. Стандартная ячейка памяти имеет емкость 1 байт. Емкость памяти из 1024 ячеек обозначают как 1К. Для адресации к ним нужно иметь 10-битный адрес. При 12-битном адресе максимальная емкость памяти должна быть $2^{12} = 4096$, т. е. 4 Кбайта, при 16-разрядном — 64 Кбайта.

Различают *основную (внутреннюю) и внешнюю память*. Внутренняя память — это ЗУ, подключенные непосредственно к шинам адреса и данных, внешние же ЗУ подключаются через устройства ввода-вывода и могут хранить большой объем информации (магнитные ленты, диски).

Различают также постоянную и оперативную память. *Постоянное запоминающее устройство* (ПЗУ или ROM — Read Only Memory, т. е. память только для чтения) позволяет только считывать информацию, но не допускает даже частичного ее изменения (записи). ПЗУ характеризуется большим объемом хранимой информации, которая не разрушается при отключении питания. *Оперативное запоминающее устройство* (ОЗУ или RAM — Random Access Memory, т. е. память с произвольным доступом) позволяет как считывать информацию, так и записывать новую. «Произвольный доступ» означает, что к информации можно обращаться, определяя адреса в любом порядке. Основным недостатком всех полупроводниковых ОЗУ является то, что при исчезновении напряжения питания записанная в них информация утрачивается. В ПЗУ хранятся, в частности, программы, в ОЗУ — данные. Микропроцессор может быть выполнен на одном кристалле с ПЗУ и ОЗУ, что повышает помехозащищенность устройства.

ПЗУ представляет собой матрицу диодов или транзисторов. В диодных ПЗУ наличие диода в данной точке соответствует записи в элементе памяти логической 1, а отсутствие — записи 0. Запись информации (программирование) в диодное ПЗУ производится путем выжигания ненужных диодов лазерным или электронным лучом. Наибольшее распространение получили ПЗУ с транзисторными элементами памяти на биполярных или МОП-транзисторах. Здесь соединение одного из электродов с землей (металлизация) соответствует 0, изоляция от земли — 1. При изготовлении ПЗУ на кристалле формируется базовая матрица без металлизации, затем с помощью специальной маски либо производится металлизация для формирования 0, либо транзистор остается неподключенным, если записывается 1. Заложённая изготовителем программа таких ПЗУ является *жесткой* и изменению не подлежит. Выпускаются также ПЗУ, *программируемые пользователем* (ППЗУ), в которых контактные соединения выполнены тонкими проводящими перемычками, наличие которых соответствует 0, отсутствие — 1. Ненужные перемычки расплавляются в процессе программирования импульсами тока с помощью специального устройства — программатора. Наконец, существуют *перепрограммируемые* ПЗУ с возможностью стирания хранимой информации и повторного программирования (СПЗУ). В зависимости от типа СПЗУ стирание производится электрическим импульсом или ультрафиолетовым облучением.

Устройства ввода-вывода (внутренние). При вводе и выводе информации центральный процессор подключается к шине данных на очень короткое время (около 1 мкс). Чтобы за это время можно было надежно записать или считать информацию, устанавливают фиксаторы информации, так называемые *защелки*. Эту функцию выполняют регистры, которые осуществляют временное хранение информации и сопряжение микропроцессорной системы с внешними устройствами при посредстве буферов. Буферный регистр с контроллером ввода-вывода образует соответственно *порт ввода* или *порт вывода*.

В современных устройствах РЗА применяются 16- или 32-разрядные микропроцессоры с высокой тактовой частотой, позволяющие выполнять обработку информации за время, меньшее дискретности выборки информации из АЦП. В сложных устройствах используют несколько микропроцессоров.

4.5.2.2. Внешние устройства. Микро-ЭВМ связаны с внешним миром посредством периферийных устройств (магнитные носители, дисплеи, АЦП и ЦАП, отдельные регистры и пр.). Для их функционирования требуются определенные управляющие сигналы, протоколы и способы обмена с микро-ЭВМ, и потому шины обмена информацией подключаются не непосредственно к периферийному устройству, а через так называемый интерфейс (лат. *inter* — между). Под этим термином понимают совокупность программных и аппаратных средств сопряжения, установления связи и обмена между компонентами системы.

Блоки питания микропроцессорных устройств построены на базе высокочастотных преобразователей напряжения с бестрансформаторным входом, позволяющим использовать постоянное или переменное напряжение питающей сети. Блок подключается к источнику аварийного питания распределительного устройства. Выходные параметры поддерживаются в широком диапазоне

питающего напряжения от -60 до $+30$ % номинального. Блок питания обеспечивает стабилизированное напряжение питания микропроцессорного набора -5 В, интерфейса аналоговых сигналов $+15$, -15 В, релейных входов и выходов 24 В. При исчезновении питающего напряжения блок формирует сигналы, препятствующие ошибочной работе РЗиА, а при восстановлении запускает программу.

Устройства ввода информации. Микропроцессорные устройства получают информацию в виде аналоговых, цифровых и логических сигналов. Устройства ввода преобразуют эти сигналы в формат, пригодный для чтения микропроцессором. Аналоговые сигналы (напряжение, ток, температура и др.) получают от стандартных датчиков систем электроснабжения, в частности измерительных трансформаторов тока (1 или 5 А) и напряжения (100 В), и преобразуют их (трансформируют и нормируют) для ввода в АЦП. Кроме АЦП, в интерфейс аналоговых сигналов входит *мультиплексор*, позволяющий использовать один преобразователь для нескольких входных сигналов. Частота выборки до 2 кГц позволяет получить осциллограммы аварийных процессов. Устройство ввода может быть выполнено на одном микропроцессоре (например, SPAC 800), который осуществляет сравнение входных сигналов с уставками, выработку аварийных сигналов для основного микропроцессора и запоминание параметров аварийного режима. Для потенциальной развязки и нормирования входных аналоговых сигналов применяют трансформаторы, так как они имеют высокую надежность и низкую стоимость, хотя и низкую временную и температурную стабильность.

Цифровая информация передается по сетевому входу, который может быть выполнен в виде проводной или оптоволоконной линии. Вход используется для передачи сигналов сетевой автоматики, дистанционного управления защищаемым фидером, сигнализации, измерительной информации.

Для ввода сигналов аппаратуры защищаемого фидера (реле, блок-контактов выключателя и пр.) применяют входные оптронные развязки, позволяющие обеспечить потенциальное разделение и нормирование входных логических сигналов с учетом требований помехозащищенности РЗиА. Питание сигнальных цепей осуществляют или от блоков питания микропроцессорных устройств РЗиА или(и) от сети управления или сигнализации распределительного устройства.

Устройства вывода сигналов. Микропроцессорные устройства выдают команды на выходные реле РЗиА, работающие как в цепях управления коммутационными аппаратами, так и в схемах автоматики и сигнализации. Информация о состоянии РЗиА и выключателя защищаемого присоединения передается также по сетевому каналу.

Аппаратура ручного ввода и отображения информации располагается обычно на передней панели блока РЗиА. Для ручного ввода используются кнопки или клавиатура. Количество кнопок на самом микропроцессорном устройстве невелико, так как для ввода большого количества информации применяют внешние устройства — *контроллеры*, пульта ввода, имеющие развитую клавиатуру и дисковые накопители информации. Выводится информация на светодиодные индикаторы, графические дисплеи, жидкокристаллические цифробуквенные табло. Возможно применение одновременно дисплеев и светоди-

одних индикаторов с целью формирования сигналов срабатывания выходных реле защиты и сигнализации. Это позволяет получить информацию о действии микропроцессорных устройств без вызова на дисплей, с использованием кнопок управления. Дисплей показывает текущие значения фазных токов, а при срабатывании защиты появляются значения аварийных токов, которые фиксируются при отключении защищаемого присоединения. В памяти процессора сохраняется несколько значений аварийных токов, которые можно вызвать на дисплей.

Принцип использования микропроцессорного устройства в релейной защите линии иллюстрируется рис. 66.

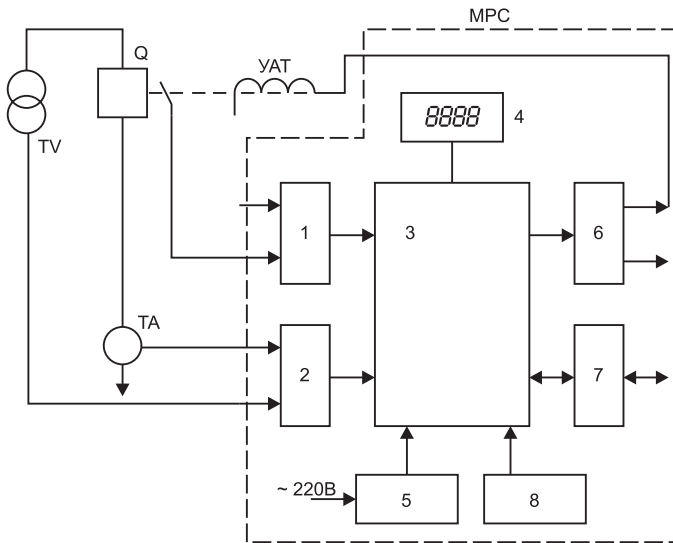


Рис. 66. Структурная схема микропроцессорного устройства (МРС) релейной защиты: 1 — интерфейс ввода дискретных сигналов; 2 — интерфейс ввода аналоговых сигналов; 3 — микро-ЭВМ; 4 — дисплей; 5 — блок питания; 6 — блок релейных выходов; 7 — сетевой интерфейс, 8 — клавиатура

4.5.3. Функции, выполняемые микропроцессорными устройствами РЗА.

Микропроцессорные устройства выполняют функции защиты и управления элементами присоединений, а также функции системной автоматики распределительного устройства. Производители стремятся создать комплекты многофункциональные устройства РЗА, пригодные для использования в любых присоединениях от 110 до 0,4 кВ. Эта тенденция объясняется тем, что аппаратное исполнение соответствующих микропроцессорных комплектов отличается несущественно и требуется только корректировка программ, а по стоимости многофункциональные устройства, так называемые терминалы, приближаются к микропроцессорным реле. Для защиты некоторых видов электрооборудования (электродвигатели, трансформаторы и др.) остаются специализированные устройства, которые могут представлять собой как узел многофункционального терминала, так и самостоятельное устройство, например регулятор напряжения силового трансформатора.

Функциональные возможности микропроцессорных устройств РЗиА обеспечивают полный комплекс защиты линий 6—35 кВ.

1. Многоступенчатая токовая защита (МТЗ).

Ступени МТЗ имеют обратнoзависимые характеристики «время—ток», соответствующие требованиям МЭК 255-4. Общее выражение для основных характеристик можно представить в виде

$$t = AT_{уст}/(K^n - 1)^m,$$

где t — время срабатывания реле, с; K — кратность тока в реле по отношению к току уставки; $T_{уст}$ — уставка по времени, с; A , m , n — коэффициенты, задаваемые для каждого вида характеристик, а именно:

$A = 0,14$; $m = 1$; $n = 0,02$ — простая зависимая характеристика;

$A = 13,5$; $m = 1$; $n = 1$ — сильно зависимая характеристика;

$A = 80$; $m = 1$; $n = 2$ — очень сильно зависимая характеристика.

Тому же выражению в сумме с $T_{уст}$ соответствуют при:

$A = 1,25$; $m = 1,8$; $n = 1$ — пологая характеристика;

$A = 0,033$; $m = 3$; $n = 1$ — крутая характеристика.

Общее выражение соответствует также и тепловой защите без памяти при $A = 35$; $m = 1$; $n = 2$. Несколько более сложной формулой, учитывающей значение тока до аварии, описывается характеристика тепловой защиты с частичной памятью.

2. Максимальная токовая защита с корректировкой по напряжению.

Защита выполняется с пуском по напряжению с одной уставкой или понижает уставку срабатывания МТЗ в зависимости от снижения трехфазного напряжения. В устройствах Seram 2000, например, изменение токовой уставки производится по формуле

$$I = [(4U/U_{ном}) - 0,2]I_{уст}/3.$$

3. Защита от замыканий на землю.

Используются датчики тока нулевой последовательности или трансформаторы фазных токов, соединенные по схеме фильтра нулевой последовательности. Защита может быть выполнена с независимой выдержкой времени или с зависимой характеристикой «время—ток».

4. Токовая направленная защита выполняется с независимой или с обратнoзависимой выдержкой времени.

5. Направленная защита от замыканий на землю.

6. Максимальная токовая защита обратной последовательности с независимой или обратнoзависимой выдержкой времени.

7. Защита синхронного электродвигателя. Осуществляются защиты от затянувшегося пуска, асинхронного хода, ограничение числа запусков с учетом достигнутой температуры, дифференциальная защита статора.

8. Защита минимального и максимального напряжения.

9. Защита по максимальной активной и реактивной мощности.

10. Защита по минимальной и максимальной частоте с независимой или обратнoзависимой выдержкой времени.

Разрабатываются и эксплуатируются также микропроцессорные устройства РЗиА для сетей 110 кВ взамен основных видов защит на электромеханических

реле, в том числе дистанционные и токовые защиты с высокочастотной блокировкой, дифференциально-фазные защиты линий.

Микропроцессорные устройства РЗА используются и для построения систем нижнего уровня АСУ энергообъектов. В системной автоматике микропроцессорные устройства позволяют с помощью программируемой логики гибко и оперативно реагировать на изменение конфигурации сетей в нормальных и аварийных условиях.

4.6. Электроавтоматика

4.6.1. Управление коммутационными аппаратами.

4.6.1.1. Управление выключателями. Алгоритмы дистанционного управления электрооборудованием подстанций, особенно выключателями, требуют применения элементов и схемных узлов автоматики.

Дистанционное включение—отключение выключателей осуществляется обычно с помощью ключей управления (типов ПМО, МК и др.). При большом разнообразии конструкции все они имеют оперативные (включить—отключить) и фиксированные положения и выполняются с самовозвратом из оперативного в фиксированное положение. Состояние контактов при различных положениях рукоятки характеризуется диаграммой ключа, приводимой в табличной или схемной форме. В качестве примера на рис. 67 приведены фрагменты схем управления выключателями с электромагнитным приводом с помощью ключей управления ПМОВФ (рис. 67а) и МКВ (рис. 67б).

Электромагнит включения ЯС потребляет большую мощность и поэтому получает питание от отдельных шин через замыкающие контакты промежуточного контактора КМ (на рис. 67 не показано). Электромагнит отключения ЯАТ потребляет небольшой ток и питается от шинки управления ШУ непо-

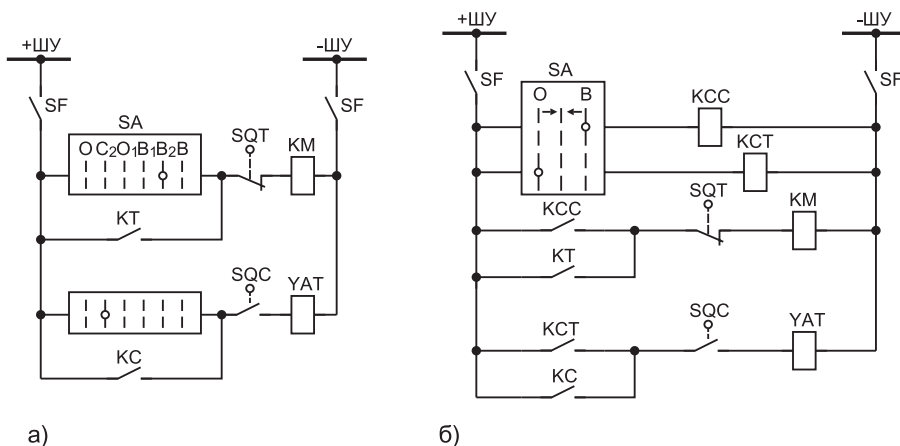


Рис. 67. Схемы управления выключателем с ключами типов ПМОВФ (а) и МКВ (б): SA — ключ управления; ЯАТ — электромагнит отключения; КМ — промежуточный контактор; КТ, КС — контакты выходных реле дистанционного управления и защиты; SQT, SQC — блок-контакты выключателя, замыкающиеся после его включения или отключения соответственно; КСТ и КСС — реле команд «отключить» и «включить»

средственно через контакты ключа SA или реле защиты и управления. Для снижения вероятности ошибочных действий персонала команда на включение подается ключом в два приема: сначала его рукоятку устанавливают в положение «предварительно включено» (B_1), а затем переводят в положение «включить» (B_2), из которого она после освобождения переходит в фиксированное положение «включено» (B). Команда на отключение также подается в два приема — «предварительно отключено» (O_1) и «отключить» (O_2), после чего освобожденная рукоятка переходит в положение «отключено» (O). Те же команды «включить» и «отключить» могут быть поданы и от реле автоматики КТ и защиты КС. Вспомогательные контакты SQT и SQC связаны с валом выключателя и размыкают цепь управления после выполнения соответствующей операции, обеспечивая тем самым кратковременность протекания тока по обмоткам электромагнитов и бестоковое размыкание контактов ключа и реле (рис. 67а).

Схема с малогабаритными ключами МКВ (рис. 67б) отличается только тем, что в нее дополнительно введены промежуточные реле КСС и КСТ, так как контакты ключа не рассчитаны на коммутацию цепей управления непосредственно; предварительных положений ключа не предусмотрено.

Схемы управления воздушными выключателями содержат еще блокировку, не допускающую исполнения команд на включение и отключение при пониженном давлении воздуха в резервуаре. Давление контролируется электроконтактным манометром и промежуточным реле, размыкающие контакты которого введены в цепь управления выключателем. Для того чтобы начавшаяся операция не прерывалась из-за некоторого падения давления воздуха в процессе ее выполнения, контакты этого реле шунтируются блок-контактами привода.

Если при включении выключателя на КЗ ключ будет задержан оператором или останется в положении «включить» из-за неисправности, то может возникнуть ситуация, когда одновременно будут действовать команды на включение (от ключа) и на отключение (от защиты). Чтобы исключить возможность многократного включения—отключения выключателя, применяется так называемая блокировка от «прыгания» — механическая или электрическая. Электрическая схема блокировки выполняется либо с помощью блок-контактов электромагнита отключения, либо посредством специального двухобмоточного реле, последовательная обмотка которого включается в цепь отключающей катушки, а параллельная — на шины управления через собственный замыкающий контакт. Поэтому реле срабатывает одновременно с отключением выключателя и самоудерживается в этом состоянии, запрещая своим размыкающим контактом повторное включение выключателя.

4.6.1.2. Автоматика отключения отделителя. Отделитель, как и разъединитель, не может самостоятельно отключать ток нагрузки, и тем более ток короткого замыкания. Автоматическое отключение отделителя только при отсутствии тока в линии наиболее просто обеспечивается с помощью специального блокирующего реле, встроенного в привод отделителя (БРО). Реле представляет собой электромеханическое устройство, содержащее электромагнит и пружинный механизм. Обмотка подключается к трансформатору тока в цепи короткозамыкателя; в нормальном режиме сердечник находится в рав-

новесии. При включении короткозамыкателя сердечник подтягивается вверх, сжимая упорную пружину, а после отключения питания линии освобождается, воздействуя через систему пружин и рычагов на механизм отключения отделителя.

Однако схема автоматики с реле БРО имеет существенные недостатки. Так, в случае КЗ на стороне ВН трансформатора одновременно действуют быстродействующая защита линии и защита трансформатора. Очевидно, что при этом выключатель линии отключится и протекание тока прекратится раньше, чем включится короткозамыкатель. Реле БРО не успеет сработать, и в бестоковую паузу отделитель не отключится, АПВ будет неуспешным, и выключатель отключится вновь. Этот недостаток может быть преодолен применением двукратного АПВ. После первого цикла АПВ под действием тока через короткозамыкатель сработает реле БРО и заведет упорную пружину. После отключения линии защитой во время второй бестоковой паузы отделитель будет отключен.

Вторым недостатком является возможность отказа реле при каскадном отключении линии, если ток в реле окажется меньше уставки. Так может произойти, например, при КЗ на линии с двусторонним питанием, когда после отключения ближайшего к месту аварии источника питания ток КЗ резко снизится. При этом возможен либо отказ отделителя, либо отключение его под током. В этой связи следует проверить расчетное значение тока КЗ при каскадном отключении линии, имея в виду, что для надежного действия БРО ток через него должен в 1,5—2 раза превышать ток срабатывания реле.

Автоматическое отключение отделителя на линиях с однократным АПВ может осуществляться по схеме рис. 68а. Здесь в качестве независимого источника оперативного тока используются предварительно заряженные конденсаторы С1 и С3, так как при отключении отделителя может быть отключено и питание оперативных цепей. Для того чтобы отделитель не отключился раньше выключателей на питающих подстанциях, в схему введены контакты токового реле КА, обмотка которого подключена к трансформатору тока в цепи короткозамыкателя. После прекращения тока КЗ конденсатор С1 разряжается на обмотку реле КТ через замкнувшиеся блок-контакты SQT короткозамыкателя и контакты реле КА. Конденсатор С2 и резистор R обеспечивают увеличение выдержки времени реле КТ до 0,3—0,4 с, так чтобы она была за-

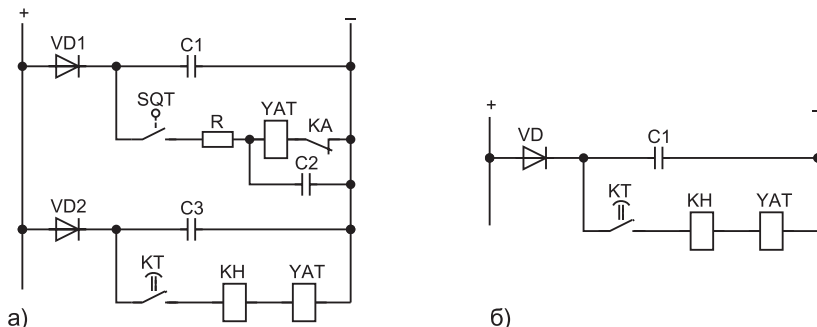


Рис. 68. Схема автоматического отключения отделителя: а — с реле времени; б — с часовым механизмом

ведомо больше времени замыкания силовых контактов короткозамыкателя. Срабатывание электромагнита отключения УАТ при разряде конденсатора СЗ индицируется посредством сигнального реле КН. Более простая и надежная схема рис. 68б работает аналогично, но вместо реле времени содержит встроенный в привод короткозамыкателя часовой механизм, который заводится при включении короткозамыкателя и отключает его по истечении заданной выдержки времени (0,5—1,0 с).

4.6.1.3. Дистанционное управление разъединителем.

На рис. 69а показан узел схемы дистанционного управления разъединителем с приводом от электродвигателя трехфазного переменного тока, который включает или отключает разъединитель в зависимости от направления вращения. Пуск и реверс двигателя осуществляется пускателями КМ1 и КМ2 при нажатии кнопок управления SBC и SBT. По окончании операции цепь пускателя разрывается вспомогательными контактами SQS разъединителя — размыкающими (после включения) или замыкающими (после отключения). Блокировочные контакты KB исключают возможность операций с разъединителем под нагрузкой.

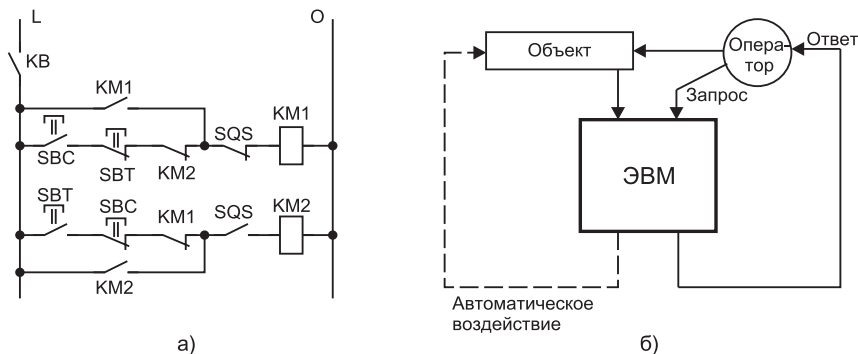


Рис. 69. Автоматическое управление разъединителем: а — дистанционное управление; б — управление с помощью ЭВМ

На рис. 69б приведена скелетная схема управления переключением разъединителя в системе АСУ. Оператор с помощью клавиатуры запрашивает указания о порядке переключений, а ЭВМ на основе имеющейся информации об оперативной схеме подстанции и о текущем состоянии объекта формирует бланк переключений, соответствующих поставленной задаче. Результатом этой работы может быть распечатка для оператора на первом этапе и автоматизация переключений — на втором.

4.6.2. Блокировки.

По назначению различают блокировки безопасности и оперативные блокировки, по выполнению — механические, электромагнитные, электрические. *Блокировки безопасности* запрещают несанкционированное проникновение людей в действующие электроустановки и опасное приближение их к частям электрооборудования, находящимся под напряжением. *Оперативные* блокировки препятствуют неправильным действиям персонала при производстве

переключений. Наиболее распространены оперативные блокировки от неправильных действий с разъединителями.

Механическая блокировка осуществляется с помощью стальных штырей или замковых конструкций и применяется в тех случаях, когда приводы отключающих аппаратов расположены рядом. Так, упор запирает привод разъединителя при включении выключателя, а замки взаимно блокируют приводы выключателя и разъединителя. При отключенном выключателе замок запирает привод и освобождает ключ, которым можно воспользоваться для отпирания привода разъединителя.

Механически соединены основные и заземляющие ножи разъединителей, так что основной нож нельзя включить, если замкнут заземляющий, и наоборот, нельзя включить заземляющий нож при замкнутом основном.

Электрическая блокировка предусматривается на приводах аппаратов с дистанционным управлением. Например, размыкающий вспомогательный контакт выключателя в цепи управления разъединителя запрещает операции с последним при включенном выключателе. Эта блокировка не исключает возможности ручного управления приводом разъединителя.

Электромагнитная блокировка применяется наиболее часто. Она выполняется с помощью механических блокировочных замков на приводах аппаратов и деблокирующего переносного ключа со встроенным электромагнитом. В корпусе замка на разъединителе размещены подвижный стальной стержень с пружиной и контактные гнезда. Оперативное напряжение 110—220 В поступает на гнезда замка разъединителя через замкнутые вспомогательные контакты отключенного выключателя. Когда оператор вставляет ключ в замок, это напряжение подается на обмотку электромагнита и сердечник его намагничивается. Стержень замка, притягиваясь к сердечнику, выходит из отверстия в механизме привода разъединителя и дает возможность отключить или включить его. После завершения операции цепь питания обмотки электромагнита размыкают кнопкой, и стержень под действием пружины запирает привод в новом положении выключателя.

В качестве блокирующих устройств камер РУ применяют электромагнитные замки, которые отпираются лишь после снятия напряжения с оборудования. Цепи питания источников повышенного напряжения в испытательных камерах оснащаются вспомогательными контактами, автоматически размыкающимися при открытии дверей.

4.6.3. Сигнализация.

На подстанции предусматриваются следующие виды сигнализации: положения коммутационных аппаратов; аварийного отключения выключателей; действия РЗиА; предупреждающая о ненормальном режиме работы оборудования.

Световая сигнализация осуществляется лампами, которые горят ровным светом при нормальном положении и оперативных переключениях аппаратов, а при аварийных отключениях, работе автоматики и в положениях «Несоответствие» подключаются к шинке мигающего света. Лампы подключаются к шинкам сигнализации через ключи управления, контакты реле РЗиА, вспомогательные контакты коммутационных аппаратов.

Сигнализация *положения* информирует персонал о состоянии главных цепей в нормальных и аварийных режимах. Конкретное выполнение схемы сигнализации зависит от применяемой аппаратуры. При использовании, например, в схеме управления выключателем ключа типа ПМОВФ подготовительные переключения в цепях сигнализации производятся контактами ключа одновременно с подачей команды, а изменение положения выключателя фиксируется его вспомогательными контактами. Если положение рукоятки ключа соответствует состоянию этих контактов (и, следовательно, положению выключателя) горит ровным светом красная лампа в положении выключателя «включено», зеленая — в положении «отключено». При автоматическом включении или отключении выключателей эти лампы горят мигающим светом.

В случае несоответствия положений ключа и выключателя мигает зеленая лампа, когда ключ находится в положениях «включено», «предварительно включено», а выключатель отключен, или горит красная лампа, когда ключ установлен в положении «отключено», «предварительно отключено», а выключатель включен. Таким образом, горящая лампа всегда указывает фактическое положение выключателя. При использовании ключей типа ПМОВ, МКВ и т. п., которые имеют только одно фиксированное положение — нейтральное, для сигнализации применяют двухпозиционное реле фиксации команды.

Для получения мигающего света используются схемы с электромеханическими реле (так называемые пульс-пары) и бесконтактные (рис. 70), которые базируются на тиристорах или логических элементах.

Когда возникает несоответствие положения выключателя, замыкается цепь сигнальной лампы (на схеме рис. 70 цепи ламп не показаны), и через эту цепь «минус» шинки управления подается на шинку мигания (+) ЕР. Релейная схема пульс-пары (рис. 70а) строится на двух реле с выдержкой времени на размыкание (KL1) и на замыкание (KL2) контактов. При подаче напряжения реле KL1 срабатывает, но лампа, включенная с ним последовательно, практически не горит. Без выдержки времени замыкаются контакты KL1.1 и KL1.2, подавая напряжение на реле KL2 и «плюс» с шинки сигнализации на шинку мигания. Сигнальная лампа загорается с полным накалом, а реле KL2 также без выдержки времени размыкает свой контакт KL2.1 в цепи реле KL1. Выдержка времени на возврат этого реле определяет время горения лампы, а реле KL2 — длительность паузы. Далее циклы повторяются до тех пор, пока ключ или реле фиксации положения выключателя не будут приведены в положение «отключено» (*квитирование* сигнала), соответствующее положению выключателя.

В некоторых схемах оба реле выполнены с замедлением и на срабатывание, и на возврат. Основное отличие этих схем от описанной выше заключается в том, что здесь контакты реле KL2 не разрывают цепь питания катушки KL1, а шунтируют ее, благодаря чему сигнальная лампа включается на полное напряжение.

Бесконтактная схема с тиристорами показана на рис. 70б. При возникновении несоответствия ток в цепи сигнальной лампы ограничивается сопротивлением резисторов R1 и R2 на уровне, недостаточном для ее свечения, и

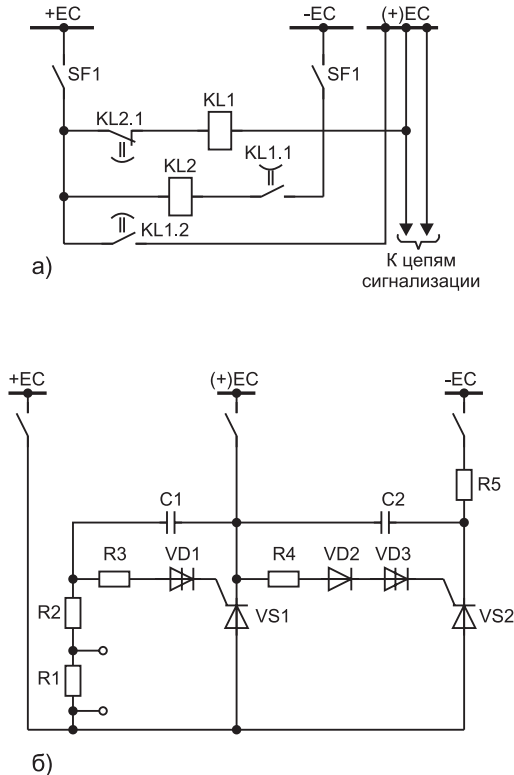


Рис. 70. Схемы устройств мигающего света:
а — релейная; б — на тиристорах

по мере заряда конденсатора $C1$ уменьшается. Когда напряжение на конденсаторе превысит значение напряжения пробоя динистора $VD1$, на управляющий электрод тиристора $VS1$ поступит положительное (относительно катода) напряжение, вследствие чего тиристор открывается и загорается сигнальная лампа. Конденсатор $C2$ оказывается под напряжением шин EC и начинает заряжаться через резистор $R5$. В конце заряда отпираются динистор $VD3$ и тиристор $VS2$, после чего разрядом конденсатора $C2$ запирается тиристор $VS1$ и лампа гаснет. Снова заряжается конденсатор $C1$ и цикл повторяется. Частоту переключений можно изменить шунтированием резистора $R1$.

Одновременно с индивидуальной световой сигнализацией запускается и общая для всех выключателей звуковая сигнализация, для которой используются электрические сирены, гудки и звонки. На рис. 71 приведена схема аварийной сигнализации с повторностью действия и сохранением принятых и действующих сигналов, построенная на базе реле импульсной сигнализации типа РИС-Э2М.

Это реле состоит из трансформатора напряжения TV , поляризованного двухобмоточного реле КНА и двух транзисторов $VT1$ и $VT2$, работающих в ключевом режиме. Обмотки реле КНА создают магнитные потоки противоположного направления, одно из которых совпадает с направлением потока постоянного магнита. Таким образом, положение якоря реле зависит от того, в

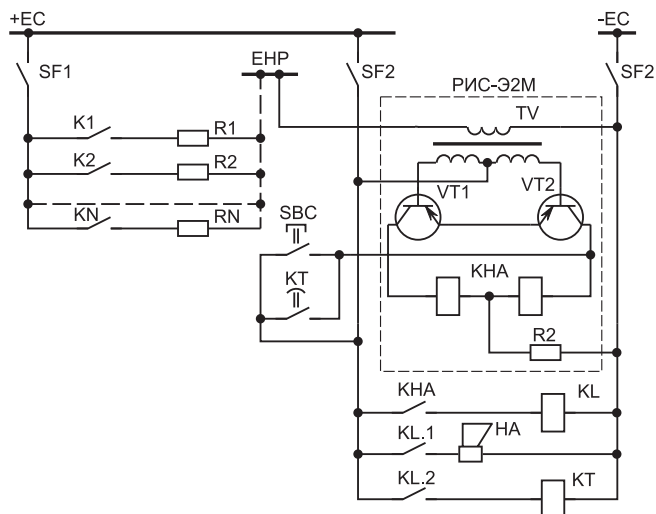


Рис. 71. Принципиальная схема звуковой аварийной сигнализации с реле PIS-Э2М

какую обмотку подан ток. Когда срабатывает защита и замыкается, например, контакт K1, в первичной обмотке трансформатора возникает ток, установившееся значение которого определяется суммарным сопротивлением этой обмотки и резистора R1. При изменении этого тока от нуля до установившегося значения на вторичной обмотке трансформатора наводится ЭДС, вызывающая отпирание транзистора VT1, благодаря чему получает питание соединенная с его коллектором катушка реле КНА. Реле срабатывает, замыкая свой контакт КНА в цепи промежуточного реле KL, а это последнее, в свою очередь, замыкает контакт KL.1 и приводит в действие сирену HA.

Снимается звуковой сигнал тем же контактом реле KL, которое отключается после подачи тока в другую катушку реле КНА либо кнопкой центрального съема сигнала SBC, либо автоматически через контакт реле времени KT. Это реле включается контактом KL.2 реле KL одновременно со звуковым сигналом и, действуя с замедлением на возврат, обеспечивает ограничение длительности сигнала. Снятие сигнала осуществляется также при квитировании ключа управления, когда цепь несоответствия разрывается контактом K1 и импульс тока противоположной полярности открывает транзистор VT2. Если до квитирования аварийно отключится еще один выключатель и замкнется, например, контакт K2, сигнал будет подан повторно, так как резисторы R1 и R2 окажутся включенными параллельно, сопротивление цепи несоответствия уменьшится и ток в цепи первичной обмотки трансформатора TV скачкообразно возрастет. Процесс повторится вплоть до отключения N-го выключателя, причем число повторных включений N ограничивается насыщением трансформатора.

4.6.4. Автоматическое повторное включение.

Статистические данные показывают, что большая часть повреждений на линиях (70—80 %) носит неустойчивый характер: они либо быстро самоустраняются, либо ликвидируются после действия защиты. На ВЛ это атмосферные перенапряжения, схлестывание проводов, перекрытие их вследствие набро-

сов, на КЛ — заплывающие пробой изоляции, КЗ на кабельных сборках и др. Кроме того, отключение потребителей может произойти при кратковременных толчках нагрузки в сети, вследствие ошибочных действий персонала или защиты и т. п. Отключившуюся линию целесообразно вновь включить под напряжение сразу же, не ожидая выяснения причин аварии, путем *автоматического повторного включения* (АПВ). Если после этого линия остается в работе, АПВ принято называть успешным. Устойчивые повреждения (обрыв проводов, тросов или гирлянд изоляторов, падение опор ВЛ, обрыв кабеля при строительных работах и т. п.) происходят значительно реже и не самоликвидируются. АПВ при таких повреждениях называют неуспешным. В необходимых случаях устройствами АПВ оснащаются не только ЛЭП, но и шины подстанций, трансформаторы.

АПВ могут быть однофазными (ОАПВ) или трехфазными, последние, в свою очередь, простыми (ТАПВ), быстродействующими (БАПВ), с проверкой отсутствия или наличия напряжения (АПВОН или АПВНН) и др. Все устройства АПВ должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Схемы АПВ должны приходить в действие при аварийном отключении по сигналу от контактов релейной защиты, от блок-контактов привода выключателя или от реле положения. В последнем случае команда на включение подается в результате несоответствия последней заданной операции «включить» действительному отключенному положению выключателя.

2. Схемы АПВ не должны приходить в действие: а) при оперативном отключении выключателя персоналом; б) при отключении его релейной защитой сразу же после включения персоналом, так как повреждения в таких случаях обычно бывают устойчивыми; в) при срабатывании отдельных защит, например газовой, дифференциальной.

3. Должно обеспечиваться действие АПВ с заданной кратностью. Наибольшее распространение получили АПВ однократного действия, на линиях 35 кВ и выше применяются АПВ двукратного и даже трехкратного действия.

4. Время действия АПВ должно быть по возможности минимальным. Наименьшая выдержка времени составляет обычно 0,2—0,3 с, выдержка времени второго цикла 10—15, третьего 60—120 с.

5. Должен обеспечиваться автоматический возврат в исходное положение после успешного АПВ.

Для того чтобы сократить период отсутствия напряжения и избежать развития аварии при повторном включении линии на устойчивое повреждение, применяют ускорение действия защиты — автоматическое снижение ее выдержки времени до определенного значения, включая и нулевое. При выполнении ускорения защиты *после* АПВ, кроме селективного действия максимальной токовой защиты с выдержкой времени, предусматривается ускоренное, но неселективное действие от мгновенного контакта, цепь которого нормально разомкнута контактом промежуточного реле ускорения с замедлением на возврат. Это реле срабатывает перед повторным включением выключателя и держит свой контакт замкнутым в течение 0,7—1 с. Поэтому, если повторное включение произошло на устойчивое КЗ (неуспешное АПВ), второй раз защита сработает без выдержки времени по цепи контакта ускорения.

В случае успешного АПВ линия кратковременно остается включенной с неселективной защитой.

Ускорение защиты до АПВ позволяет ускорить отключение КЗ и обеспечить селективное отключение повреждений. С этой целью защита линии выполняется так, что первый раз она действует по цепи ускорения, без выдержки времени. После АПВ, если повреждение устранилось, линия остается в работе, если же повреждение оказалось устойчивым, защита вновь отключит линию, но уже с нормальной выдержкой времени.

Иногда применяют *поочередное* АПВ, обеспечивающее и селективное, и быстрое отключение поврежденной линии при помощи ускоренной неселективной защиты. Однако такие схемы сложны, и, поскольку АПВ линий производится начиная с головного участка, перерыв питания потребителей получается тем длиннее, чем больше номер ступени АПВ.

Схемы АПВ выключателей с электромагнитным приводом строятся на базе типовых комплектных устройств — чаще всего реле РПВ-58 и РПВ-258 (рис. 72). В комплект РПВ-58 входят: реле времени КТ1; промежуточное реле КЛ1 с параллельной КЛ1(1) и последовательной КЛ1(2) обмотками; конденсатор С, обеспечивающий однократность действия АПВ; зарядный R2 и разрядный R3 резисторы.

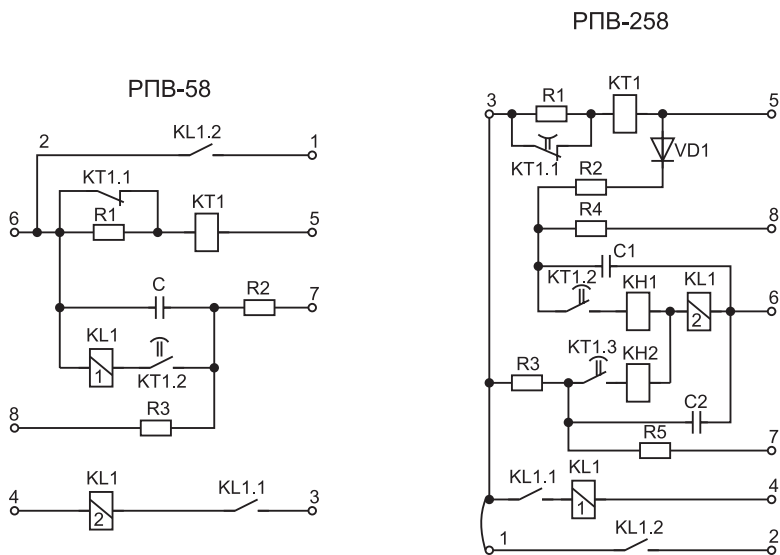


Рис. 72. Комплектные устройства типов РПВ-58 и РПВ-258 для схем АПВ однократного и двукратного действия

При включении выключателя конденсатор С заряжается через резистор R2. Пуск АПВ происходит при аварийном отключении выключателя, когда ключ управления остается в положении «включено»: тогда замыкается вспомогательный контакт выключателя и получает питание обмотка реле времени КТ1. По истечении выдержки времени это реле замыкает свой контакт КТ1.2, током разряда конденсатора С на параллельную обмотку КЛ1(1) включается промежуточное реле КЛ1 и подает импульс на включение выключателя. Бла-

годаря обмотке КЛ1(2), соединенной последовательно с контактором включения выключателя, реле самоудерживается на время, необходимое для срабатывания привода выключателя.

Если повреждение было неустойчивым, то линия остается в работе. Размыкается вспомогательный контакт выключателя, разрывается цепь питания реле времени, конденсатор С начинает заряжаться вновь, и спустя 20—25 с схема АПВ будет автоматически подготовлена к повторному действию. Если же повреждение было устойчивым, то включенный при АПВ выключатель снова отключится защитой. Затем, как и ранее, сработает реле КТ1, но реле КЛ1 второй раз не включится, так как конденсатор С зарядиться не успеет, — АПВ действует однократно. При отключении выключателя ключом управления положение несоответствия не создается и оперативное напряжение на схему АПВ не поступает.

Схема реле РПВ-258, в отличие от РПВ-58, содержит два конденсатора. Хотя при неуспешном АПВ конденсатор С1 зарядиться не успевают, реле КЛ1, тем не менее, включается разрядом конденсатора С2; включается и выключатель. Если второй цикл АПВ оказывается успешным, схема возвращается в исходное состояние и начинается заряд конденсаторов. Если же неуспешен и второй цикл, то реле КТ1 срабатывает вновь и остается под напряжением, пока не будет квитирован ключ управления (снят «+» с вывода 3). Контакты КТ1.2 и КТ1.3 замыкают цепи конденсаторов С1 и С2, но, так как они еще не заряжены, АПВ не происходит. Зарядиться они не могут, так как конденсатор С1 замкнут на резистор R2, а конденсатор С2 — на обмотки реле. Диод VD препятствует разряду конденсатора С1 во время первого цикла.

Находят применение также реле типа РПВ-358, РПВ-69Т. Реле РПВ-358 обеспечивает однократное действие АПВ для линий с одно- и двусторонним питанием, но может применяться на подстанциях с оперативным переменным или постоянным током напряжением 24 и 48 В, оборудованных выключателями с дистанционным управлением.

Взамен реле РПВ-58 и РПВ-258 предназначены статические реле РПВ-01 и РПВ-02. Номинальное оперативное напряжение переменного тока 220 или 110 В, номинальный ток удерживающей (токовой) обмотки от 0,25 до 4 А, регулировка уставки — ступенями. Потребляемая мощность в длительном режиме — до 7 Вт. Диапазоны выдержки времени на включение: 0,5—10 с (РПВ-01 и первое включение РПВ-02) и 5—100 с (второе включение РПВ-02). Время повторной готовности после каждого цикла 15—60 с (РПВ-01) и 30—120 с (РПВ-02).

Реле построены на базе интегральных микросхем серии К176. Генератор колебаний регулируемой частоты на операционном усилителе и счетчик импульсов образуют орган измерения выдержки времени, которую можно изменять подбором параметров RC-цепи генератора. Выходные цепи реле гальванически не связаны с основной схемой реле.

В схемах присоединений с воздушным выключателем предусматривается запрет действия АПВ при недостаточном давлении сжатого воздуха. При включении выключателя расход воздуха незначителен и снижение давления несущественно, но при отключении давление в резервуарах резко понижается. Поэтому для дистанционного управления должен быть обеспечен запас возду-

ха в расчете на одну операцию отключения, а для однократного АПВ — на две такие операции, с тем чтобы при повторном включении на неустранившееся КЗ выключатель был готов к отключению. Двукратное АПВ на воздушных выключателях применяется редко, так как для трехкратного отключения КЗ (один раз до АПВ и два раза после неуспешного АПВ) объем воздуха в резервуарах может оказаться недостаточным и потребуются установка дополнительных бачков.

Большинство повреждений на *шинах* подстанции оказывается неустойчивыми, и эффективность использования АПВ здесь весьма высока. Выполняется АПВ с действием от защиты шин (обычно дифференциальной) и осуществляется двумя способами: 1) использование устройств АПВ присоединений, подключенных к шинам подстанции (линий и трансформаторов), и 2) установка отдельных комплектов АПВ. Если подстанция питается от нескольких линий, может осуществляться АПВ не одной, а нескольких или всех линий. В случае успешного АПВ первой линии поочередно включаются выключатели других линий. Если первая линия включилась на устойчивое КЗ, то снова срабатывает защита шин. При этом действие АПВ других линий блокируется и их выключатели не включаются.

АПВ *трансформатора* применяется как для одиночных трансформаторов, отключение которых может привести к ущербу или аварии, так и для параллельно работающих трансформаторов, установленных на подстанциях без обслуживающего персонала. На подстанциях с односторонним питанием и одним трансформатором АПВ этого трансформатора является обязательным. При наличии двух или нескольких трансформаторов АПВ выполняют в том случае, когда отключение одного из них может привести к нарушению питания потребителей.

При повреждении внутри трансформатора АПВ может увеличить тяжесть аварии, и потому действие АПВ запрещается. Схема с реле РПВ-58, например, строится так, что при срабатывании дифференциальной или газовой защиты трансформатора конденсатор С, обеспечивающий однократное действие реле, быстро разряжается. Применяются схемы пуска от максимальной токовой защиты и от несоответствия положений ключа управления и выключателя.

4.7. Устройства автоматического включения резервного источника питания (АВР)

Все схемы АВР должны удовлетворять следующим основным требованиям.

1. Схема должна приходить в действие при исчезновении напряжения на шинах потребителей по любой причине, в том числе и при КЗ.
2. Для уменьшения перерыва питания потребителей включение АВР должно производиться сразу же после отключения рабочего источника.
3. Действие АВР должно быть однократным.
4. Должно предусматриваться ускорение защиты резервного источника после АВР.

5. Схема не должна приходить в действие до отключения рабочего источника.

6. Пусковые органы минимального напряжения не должны действовать при неисправностях в цепях напряжения. С этой целью применяют включение минимальных реле на разные трансформаторы напряжения, используют реле минимального тока рабочего источника, трехфазный выпрямительный мост и др.

Большое количество подстанций с двумя или более источниками питания работает по схемам одностороннего питания. В одной из схем один источник (рабочий) включен, а другой (резервный) отключен, во второй схеме включены все источники, но каждый работает отдельно на своих потребителей. Деление осуществляется на одном из выключателей. Недостатком одностороннего питания является то обстоятельство, что аварийное отключение рабочего источника приводит к прекращению питания потребителей. Этот недостаток может быть во многих случаях преодолен путем быстрого автоматического включения резервного источника или включения выключателя, на котором производится деление сети.

АВР трансформатора. Пусть, например, питание потребителей нормально производится от рабочего трансформатора Т1, а трансформатор Т2 находится в резерве. При отключении трансформатора Т1 блок-контакты его выключателя дают команду на включение обоих выключателей (ВН и НН) трансформатора Т2. Благодаря тому, что этот сигнал подается через контакты промежуточного реле с выдержкой времени на возврат 0,4—0,6 с, обеспечивается однократность действия АВР: если Т2 включился на неустранившееся КЗ и отключился своей защитой, его повторного включения не произойдет, так как контакты реле будут разомкнуты.

Подобная схема не подействует, если при отсутствии КЗ по той или иной причине исчезнет напряжение на шинах ВН рабочего трансформатора, так как выключатели трансформатора останутся включенными. АВР в этом случае обеспечивается специальным пусковым органом, выполненным на двух реле минимального напряжения. При исчезновении напряжения эти реле замкнут свои контакты в цепи реле времени, действующего в конечном счете на отключение обоих выключателей рабочего трансформатора.

АВР секционного выключателя. Пусть, например, питание секций шин подстанции осуществляется от двух рабочих трансформаторов Т1 и Т2. Секционный выключатель нормально отключен. При отключении любого из трансформаторов Т1 или Т2 происходит автоматическое включение секционного выключателя средствами АВР. На случай включения на неустранившееся КЗ предусмотрено ускорение защиты секционного выключателя после АВР. В отличие от АВР трансформатора пусковой орган минимального напряжения здесь не нужен, так как оба источника питаются от общих шин высшего напряжения и при исчезновении напряжения на них действие АВР будет бесполезным.

АВР линий. Пусть, например, участок сети имеет двустороннее питание от источников I и II, промежуточные же подстанции получают одностороннее питание. Схема АВР обеспечивает восстановление питания всех потребителей в случае аварийного отключения одного из этих источников. Действие АВР

обычно увязывается с АПВ линий, что обеспечивает наибольшую эффективность работы автоматики.

Некоторую специфику имеет АВР на переменном оперативном токе. Простейшей является схема АВР одностороннего действия для подстанции с выключателями, имеющими грузовые или моторные приводы без автоматического завода груза или пружин. Нормально подстанция питается от рабочего источника, резервный же находится под напряжением, а его выключатель отключен. Груз или пружины этого выключателя должны быть заведены, т. е. груз поднят, а пружины натянуты.

Пусковым органом АВР является реле минимального напряжения прямого действия, встроенное в привод рабочего выключателя. При исчезновении напряжения на шинах подстанции реле срабатывает и с заданной выдержкой времени отключает выключатель. Блок-контакт последнего подает напряжение на включающую катушку выключателя резервного источника, которая освобождает механизм зацепления, удерживающий груз или пружины в заведенном состоянии. Если включение произошло на установившееся КЗ, то резервная линия отключается.

Когда выключатель резервного источника оборудован грузовым или пружинным приводом с автоматическим заводом, реле минимального напряжения действует на отключающую катушку выключателя рабочего источника питания. Однократность действия АВР обеспечивается тем, что для подготовки включившегося выключателя резервной линии к новому действию происходит автоматическое натяжение пружины или подъем груза с помощью вспомогательного двигателя, питание которого осуществляется через замыкающий блок-контакт рабочего выключателя. Таким образом, если резервный выключатель отключился при включении на устойчивое КЗ, то повторно включиться он не сможет, так как цепь питания двигателя будет разомкнута и груз или пружины привода заведены не будут.

Напряжение срабатывания реле напряжения принимается равным

$$U_{\text{ср}} = (0,25—0,40)U_{\text{ном}}$$

В схемах пусковых органов применяются реле напряжения, которые имеют пределы уставок 15—60 В и допускают длительное включение на напряжение 100 и 220 В.

4.6.6. Автоматическая разгрузка трансформаторов. Для предотвращения повреждения трансформаторов при перегрузке применяются схемы автоматической разгрузки трансформаторов. При значительной перегрузке часть потребителей отключается, с тем чтобы с оставшейся нагрузкой трансформатор мог работать 1—2 ч. Автоматика действует однократно.

Наиболее простая схема содержит токовое реле и многопозиционное реле времени. Токовое реле, срабатывающее при перегрузке, включает реле времени, которое, спустя первую выдержку времени, отключает первую группу потребителей. Если недопустимая перегрузка будет продолжаться и токовое реле не возвратится в исходное положение, реле времени отключит вторую группу потребителей с выдержкой времени второй ступени и так до 4—5 ступеней. Уставка срабатывания токового реле принимается порядка $(1,3—1,4)I_{\text{ном}}$

трансформатора. Выдержка времени первой ступени принимается 5—10 мин, а каждой последующей ступени на 0,5 мин больше предыдущей.

Иногда дополнительно используется электроконтактный термометр, измеряющий температуру верхних слоев масла в трансформаторе. Цепь реле времени замыкается при срабатывании как токового реле, так и термометра, уставкой которого принимается 70—80 °С. Схема может быть дополнена вторым токовым реле с уставкой $(1,5—1,6)I_{ном}$, действующим на реле времени без температурного контроля.

4.6.7. Автоматическое регулирование напряжения и коэффициента мощности.

4.6.7.1. Принципы регулирования. Регулирование напряжения и коэффициента мощности часто осуществляется одними и теми же средствами, поэтому соответствующие мероприятия рассматриваются совместно.

Поддержание напряжения на уровне, близком к номинальному, имеет особое значение для потребителя: снижение его хотя бы на 5—10 % может привести к недоотпуску продукции (электродвигатели, электропечи) и даже браку (контактная сварка, высокочастотная закалка), а повышение — к ускоренному износу изоляции, снижению срока службы электрооборудования (срок службы ламп накаливания, например, сокращается втрое при повышении напряжения на 10 %).

Потерю напряжения можно рассчитать как

$$\Delta U = \frac{Pr + Qx}{n_t U_{нн}},$$

где $U_{нн}$ — напряжение на шинах потребителя; P , Q — активная и реактивная составляющие мощности, передаваемой по линии; r , x — активное и реактивное сопротивление питающей линии и трансформатора; n_t — коэффициент трансформации силового трансформатора.

Из приведенного выражения видно, что изменить напряжение с помощью установленного на подстанции оборудования можно двумя способами: 1) изменением коэффициента трансформации трансформатора посредством переключения устройств и 2) компенсацией реактивной мощности с помощью синхронных компенсаторов (двигателей) или статических конденсаторов (применяется и для повышения коэффициента мощности). Компенсирующая емкость подключается параллельно индуктивности сети (*поперечная* компенсация), а иногда последовательно в сеть (*продольная* компенсация), что позволяет также уменьшить колебания напряжения. Обычно подключение осуществляется в точке, к которой подсоединены наиболее мощные потребители, а также электроустановки, вызывающие существенное искажение кривой напряжения питающей сети (тиристорные преобразователи, дуговые электропечи).

Устройства автоматического регулирования напряжения трансформатора под нагрузкой (РПН) путем изменения коэффициента трансформации были рассмотрены в разделе 1 «Трансформаторы».

Отключение статических конденсаторов, когда напряжение на шинах повышено, и включение их при снижении напряжения позволяют уменьшить колебания напряжения, стабилизировать его. Автоматическое управление ре-

жимом осуществляется в функции напряжения на шинах подстанции, тока нагрузки или направления мощности в линии. Применяется также управление по заданной программе, например с помощью электрических часов.

Способы регулирования мощности конденсаторных батарей (КБ) можно разделить на три группы:

- 1) ступенчатое регулирование путем включения или отключения отдельных секций КБ или изменения схемы соединений;
- 2) плавное изменение реактивной мощности с помощью специальных устройств, например тиристорных;
- 3) регулирование путем изменения индуктивности, включенной параллельно или последовательно с емкостью.

4.6.7.2. Ступенчатое регулирование конденсаторных батарей. *Одноступенчатое* регулирование (т. е. одновременное отключение — включение всех секций КБ) является грубым и не всегда приемлемым, поэтому преимущественное распространение получило *многоступенчатое* регулирование. В качестве примера на рис. 73 показана структурная схема многоступенчатого регулятора типа АРКОН.

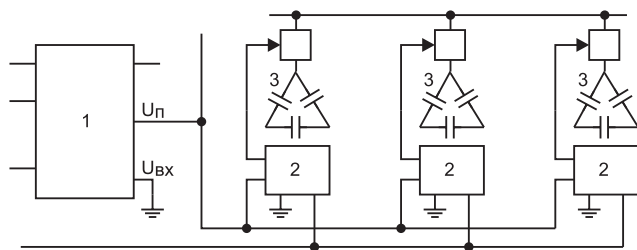


Рис. 73. Структурная схема регулятора АРКОН

Регулирование здесь осуществляется по напряжению (линейному или фазному) или по напряжению с коррекцией по току нагрузки и углу между ними. При регулировании по напряжению на командный блок 1 подаются напряжение питания U_n и входное напряжение $U_{вх}$, для коррекции по току подключается ток свободной фазы от трансформатора тока ввода и от трансформатора тока КБ. Командный блок 1 с выдержкой времени 1—3 мин посылает программному блоку 2 команду на включение или отключение секции 3 батареи, в зависимости от значения входного сигнала.

В качестве коммутационных аппаратов для изменения числа рабочих секций КБ целесообразно использовать тиристорные выключатели, которые допускают большое число срабатываний, позволяют снизить бросок тока при включении, исключить переходный процесс при отключении и сократить время включения и отключения КБ. Наиболее благоприятным для включения КБ является момент перехода через нуль напряжения сети, для отключения — момент перехода тока через нулевое значение.

4.5.7.3. Плавное изменение мощности КБ с помощью тиристорных устройств. Тиристорные регуляторы позволяют плавно изменять ток, а следовательно, и реактивную мощность КБ. Изменение значения протекающего тока

достигается изменением угла проводимости (времени открытого состояния) тиристоров: чем меньше угол проводимости, тем меньше действующее значение первой гармоники тока, протекающего через КБ. Для уменьшения угла проводимости тиристоры гасят ранее точки естественной коммутации, применяя искусственную коммутацию. С этой целью параллельно КБ подключают сторонний источник импульсов тока. Когда напряжение импульса станет больше коммутирующего напряжения сети, ток в проводящем вентиле снизится до нуля и тиристор закроется. Существенным недостатком такого регулятора является искажение формы кривой тока, тем более сильное, чем меньше угол проводимости.

4.5.7.4. Плавное регулирование с помощью индуктивности. Наиболее высокое качество регулирования достигается применением постоянно включенных конденсаторов (фильтров гармоник) и реакторов, управляемых тиристорами (рис. 74).

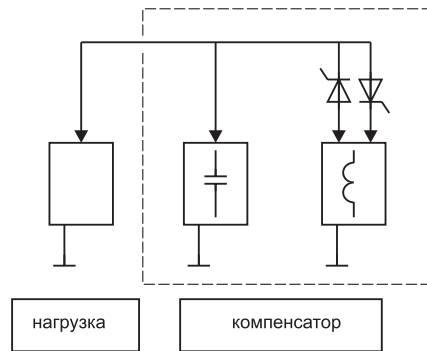


Рис. 74. Структурная схема компенсатора с емкостью и регулируемой индуктивностью

Такие установки используются в сетях напряжением 6—20 кВ. Если напряжение сети меньше заданного, то вся реактивная мощность, генерируемая конденсаторами, поступает в сеть. Когда напряжение сети возрастает выше номинального, часть мощности потребляется реакторами до их номинальной загрузки. Управление реактивной мощностью осуществляется с помощью тиристоров. Для регулирования напряжения кабельных линий используются компенсаторы, содержащие только реакторы, так как КЛ имеют значительную собственную емкость.

Система управления компенсатором измеряет напряжение сети и несколько других параметров: переток реактивной мощности по одной или нескольким линиям либо через компенсатор; мощность или ее изменение по линиям; изменение угла между током и напряжением; изменение частоты сети. Компенсаторы подключаются на стороне НН (до 20 кВ), так как из-за отсутствия единичных вентилях на напряжение выше нескольких киловольт создание тиристорных регуляторов на более высокое напряжение технически сложно и экономически не оправдано. Измерительные устройства устанавливаются на стороне ВН с целью контроля напряжения и перетока реактивной мощности в линиях высокого напряжения, поскольку другие устройства регулирования

напряжения (РПН трансформатора) находятся на стороне ВН подстанции. Регулятор использует измеренные параметры для установления требуемой выходной мощности компенсатора. Выходной сигнал регулятора поступает на блок формирования управляющих импульсов тиристоров, угол управления которыми и определяет компенсируемую реактивную мощность.

Компенсаторы могут работать в функции напряжения или реактивной мощности в линии, с уставками соответственно по значению напряжения или по значению и направлению перетока реактивной мощности. При регулировании напряжения в линии регулятор компенсатора должен выдавать сигнал также и в систему РПН трансформатора для обеспечения работы обоих устройств. Компенсатор имеет набор защит, действующих при внутренних и внешних отклонениях параметров нормальной работы.

4.6.8. Источники питания вспомогательных цепей.

Источники электропитания чрезвычайно разнообразны и различаются по назначению, принципу устройства, конструкции, мощности, роду тока и пр.

4.6.8.1. Постоянный ток. Наиболее надежным, «классическим» источником оперативного *постоянного* тока для питания цепей релейной защиты, автоматики, управления и сигнализации является аккумуляторная батарея (АКБ), собираемая обычно из свинцово-кислотных аккумуляторов. Однако ввиду дороговизны и необходимости квалифицированного обслуживания АКБ устанавливаются лишь на электростанциях и крупных подстанциях. Как компромисс, более широко применяются АКБ небольшой емкости для питания слаботочных оперативных цепей.

Для обеспечения нормальной работы аккумуляторов используются зарядно-подзарядные агрегаты, чаще всего в виде регулируемых (тиристорных) выпрямителей. Если выпрямитель предназначен для питания нагрузки на время отключения АКБ, он снабжается индуктивным фильтром (дросселем). При работе только на аккумулятор форма тока роли не играет и фильтр не требуется. Когда АКБ и выпрямитель работают параллельно, отдельный фильтр также не требуется, так как аккумулятор сам по себе представляет большую фильтрующую емкость.

Применяются и комплектные устройства — шкафы управления оперативным постоянным током (ШУОТ), в которых смонтированы АКБ и подзарядное устройство на тиристорах. Выходное напряжение подзарядного устройства сглаживается и стабилизируется. В нормальном режиме мощность в нагрузку отдает подзарядное устройство, а при понижении питающего напряжения — АКБ.

Номинальное напряжение оперативного постоянного тока составляет обычно 110—220 В. Использование меньших значений напряжения нежелательно ввиду того, что при этом контакты и контактные соединения часто оказываются ненадежными.

Для преобразования напряжения 110—220 В к значениям, необходимым для питания схем с полупроводниковыми приборами (5, 9, 15 В и др.) применяют делители напряжения АКБ и полупроводниковые преобразователи напряжения. В схемах делителей напряжения одновременно осуществляется и

стабилизация выходного напряжения. Недостаток делителей напряжения на резисторах и транзисторах — большая рассеиваемая мощность.

Широко распространены схемы защиты, не требующие применения аккумуляторов.

4.6.8.2. Схемы на *переменном* оперативном токе с дешунтированием электромагнитов управления (отключения выключателя или включения короткозамыкателя). Источником питания служит трансформатор тока (ТА). При срабатывании выходного реле защиты сначала замыкается цепь электромагнита управления и лишь затем размыкается контакт реле, шунтирующий электромагнит (реле тока серии РТ80, промежуточные реле типа РП-341). В отсутствие замыкающего контакта возможно было бы срабатывание электромагнита при максимальных токах внешних КЗ даже в том случае, если бы выходное реле не сработало. Резкое увеличение нагрузки ТА при введении в его цепь обмотки мощного электромагнита может вызвать возврат измерительных органов защиты. Поэтому необходимо проверять отсутствие возврата выходного реле после дешунтирования и допустимость максимального тока КЗ для контактов реле.

Находят также ограниченное применение схемы с промежуточными насыщенными трансформаторами (ПНТ) во вторичных цепях ТА, являющимися источником переменного оперативного напряжения для питания реле и электромагнитов.

4.6.8.3. Схемы на *выпрямленном оперативном токе*. Выпрямленное напряжение получается из переменного посредством полупроводниковых выпрямительных мостов: однофазного (так называемый мостик Греча), трехфазного с нулем (мост Миткевича, трехфазная пульсация) или трехфазного моста Ларионова (шестифазная пульсация). Выпускаются типовые выпрямительные блоки (регулируемые и нерегулируемые) со стабилизаторами и фильтрами выходного напряжения. Наибольшее распространение получили комбинированные источники — с выпрямительными блоками тока и напряжения, питающимися соответственно от трансформаторов тока и от трансформаторов напряжения или собственных нужд. В нормальном режиме выпрямленное выходное напряжение обеспечивает блок напряжения (БПН), а при КЗ — *токовый блок* питания (БПТ) либо оба блока, работающие параллельно. В последнем случае надо иметь в виду, что даже при одинаковом среднем значении выходного напряжения каждого из блоков результирующее значение может существенно от него отличаться вследствие разницы по фазе питающих напряжений переменного тока. Этот недостаток можно устранить применением регулируемого БПН или БПТ с обратной связью по результирующему напряжению.

Выпрямленное напряжение заданного значения можно получить и из постоянного напряжения другого уровня с помощью преобразователей, называемых *инверторами*. Преобразователь представляет собой прерыватель постоянного тока, осуществляющий поочередное подключение к его выходным зажимам положительного и отрицательного полюсов источника питания. Получаемое импульсное напряжение трансформируется и выпрямляется.

Автономным называют инвертор, отдающий энергию автономной нагрузке, которая помимо инвертора не имеет других источников питания. На выходе автономного инвертора может быть получено переменное напряжение с необходимой амплитудой и частотой.

Прерывание тока осуществляется ключами на транзисторах или тиристорах, управляемых импульсами от независимого источника заданной частоты (мультивибратора, блокинг-генератора и др.) или поступающими с частотой, зависящей от параметров нагрузки (инвертор с самовозбуждением). Транзисторные ключи применяются для маломощных преобразователей (до нескольких сотен ватт), тиристорные же переключатели могут быть изготовлены для блоков питания любой мощности. Однако для запираания тиристоров путем искусственной коммутации дополнительно требуются источники коммутирующего напряжения, которыми обычно служат конденсаторы.

Упрощенная схема автономного инвертора на тиристорах представлена на рис. 75а. Батарея коммутирующих конденсаторов C присоединена к вентильной обмотке трансформатора T с тиристорами $VS1$ и $VS2$ в ее цепи. Пусть в данный момент проводит ток вентиль $VS1$, а вентиль $VS2$ заперт. Коммутирующий конденсатор C заряжается от источника постоянного напряжения таким образом, что его левая по схеме обкладка приобретает отрицательный потенциал. В момент, когда вентиль $VS1$ еще проводит ток, на вентиль $VS2$ подается отпирающий импульс, и конденсатор C оказывается замкнутым через оба вентиля. Возникающий при этом ток разряда конденсатора уменьшает ток вентиль $VS1$ и увеличивает ток вентиль $VS2$. Когда ток через вентиль $VS1$ становится меньше тока удерживания, вентиль закрывается и отрицательный полюс источника питания через $VS2$ соединяется с правой обкладкой конденсатора, который начинает перезаряжаться. Далее отпирается управляющим импульсом вентиль $VS1$, происходит коммутация тока с вентиль $VS2$ на $VS1$ и т. д. Процесс перезарядки конденсатора повторяется периодически, а переменное напряжение на его обкладках, приложенное к вентильной обмотке трансформатора T , наводит ЭДС в нагрузочной обмотке последнего. Форма

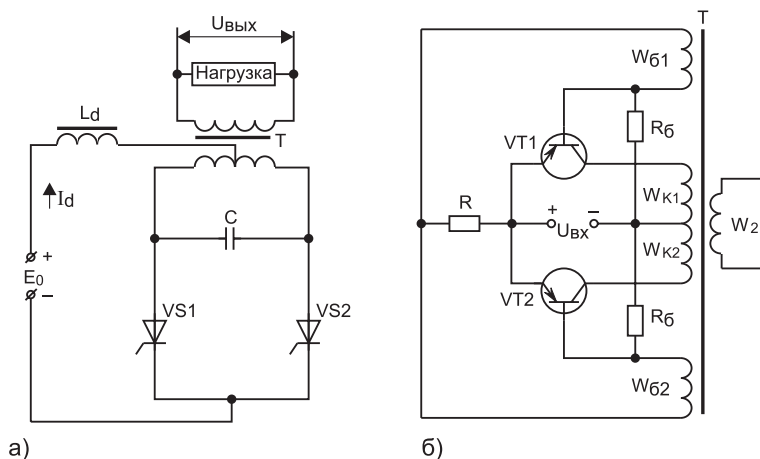


Рис. 75. Упрощенные схемы автономного инвертора на тиристорах (а) и транзисторного автогенератора (б)

кривой выходного напряжения зависит от параметров нагрузки и в общем случае не является синусоидальной.

Коммутирующие конденсаторы можно подключать и со стороны нагрузочной обмотки — параллельно или последовательно с нагрузкой; описанное устройство относится к числу параллельных инверторов.

Схемы источников управляющих импульсов чрезвычайно разнообразны. Получили распространение схемы генератора на базе насыщающегося трансформатора, который одновременно может служить и выходным трансформатором (рис. 75б). При подаче напряжения на схему один из транзисторов, например VT1, отпирается. Ток в коллекторной обмотке w_{k1} вызывает ток в базовых обмотках w_{61} и w_{62} , который увеличивает отпирающий ток в транзисторе VT1 и запирает VT2. После насыщения магнитопровода трансформатора Т, обусловленного постоянным током через обмотку w_{k1} , ЭДС базовых обмоток резко снижается, и ток через транзистор VT1 уменьшается. При этом ЭДС базовых обмоток меняет свой знак, и начинается перемагничивание магнитопровода трансформатора. Знакопеременный магнитный поток вызывает появление на всех обмотках трансформатора импульсов ЭДС прямоугольной формы.

Недостатком такого преобразователя являются большие потери в трансформаторе, соизмеримые с мощностью нагрузки. В серийно выпускаемых преобразователях, устроенных по аналогичному принципу, например в блоках питания устройства ЯРЭ-2201, насыщающийся трансформатор и выходной трансформатор выполнены раздельно.

4.6.8.4. Схемы с предварительно заряженными конденсаторами. Конденсаторы как источники питания используются для подачи достаточно мощного, но кратковременного импульса или для питания схем с малым собственным потреблением (например, схем на полупроводниковых приборах), так как энергия, которая может быть накоплена в конденсаторах серийного изготовления, сравнительно невелика. Как известно, заряд (количество электричества) пропорционален силе тока и времени его протекания. Время заряда обычно не лимитируется, так что его можно производить от маломощного источника, в частности от измерительных трансформаторов. Зарядные устройства, питаемые от трансформаторов напряжения, состоят из промежуточных трансформаторов с выпрямителями на выходе. Токовые зарядные устройства выполняются аналогично БПТ.

Применяются в основном групповые зарядные устройства. Для того чтобы при разряде конденсаторов одной из групп не разряжались остальные, прибегают к разделению конденсаторных батарей посредством реле или диодов. В первом случае каждая группа конденсаторов заряжается через размыкающий контакт реле, а разряжается через его замыкающий контакт, во втором — каждая группа подключается к зарядному устройству через развязывающие диоды. Схемы с диодным разделением более просты и надежны.

4.6.8.5. Стабилизаторы. Стабилизаторы напряжения переменного тока строятся обычно на феррорезонансном принципе, т. е. с использованием явления резонанса в цепи, содержащей ферромагнитный элемент (дроссель или трансформатор). Пояснить действие феррорезонансного стабилизатора можно с по-

мощью эквивалентной схемы, состоящей из последовательно соединенных насыщающегося дросселя и конденсатора. Параметры этих элементов подобраны таким образом, что при частоте питающей сети в цепи устанавливается режим *резонанса напряжений*, характеризующийся следующими особенностями: падения напряжения на индуктивности дросселя (трансформатора) и емкости конденсатора равны; ток в цепи определяется только входным напряжением и активным сопротивлением дросселя; при рабочих значениях тока магнитопровод дросселя находится в состоянии насыщения. При изменении входного напряжения и тока (в определенных пределах) падение напряжения на насыщенном дросселе изменяется незначительно, и, следовательно, достигается *стабилизация напряжения* на нагрузке, подключенной к дросселю.

Простейшим стабилизатором напряжения *постоянного* тока является стабилитрон, используемый как самостоятельно, так и в составе полупроводниковых стабилизаторов различных типов и сложности. Самая простая схема стабилизации (рис. 76) состоит из стабилитрона VD и балластного резистора R_s , ограничивающего ток через прибор. Ввиду того, что на резисторе бесполезно расходуется значительная часть мощности, применяется такая схема только для маломощной нагрузки. Такой стабилизатор относится к числу *параллельных, параметрических*: стабилизирующий элемент включен параллельно нагрузке, выходное напряжение не регулируется.

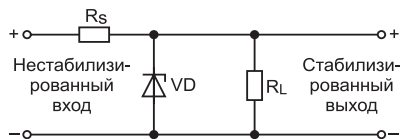


Рис. 76. Параметрический стабилизатор на стабилитроне

К разряду параллельных стабилизаторов относится и устройство по схеме рис. 77а с регулируемым стабилизирующим элементом на транзисторе VT. Стабилитрон выполняет здесь роль источника опорного напряжения. Когда входное напряжение возрастает, положительный потенциал базы транзистора увеличивается, его коллекторный ток растет и, соответственно, увеличивается падение напряжения на балластном резисторе, компенсируя изменение входного напряжения. При уменьшении входного напряжения коллекторный ток транзистора и падение напряжения на балластном резисторе уменьшаются, а выходное напряжение приближается к заданному значению. Значение выходного стабилизированного напряжения определяется положением движка потенциометра R1. Как и во всех параллельных стабилизаторах, потери мощности велики. Однако по сравнению с параметрическим стабилизатором стабильность выходного напряжения здесь значительно выше благодаря усилительным свойствам транзистора.

В последовательном стабилизаторе (рис. 77б) регулирующий транзистор (иногда его называют *проходным*) включен последовательно с нагрузкой. Он работает как регулируемое балластное сопротивление, выполняя то же назначение, что и в параллельном стабилизаторе, и так же неэкономично расходуя большую мощность. Напряжение на базе транзистора VT фиксировано стаби-

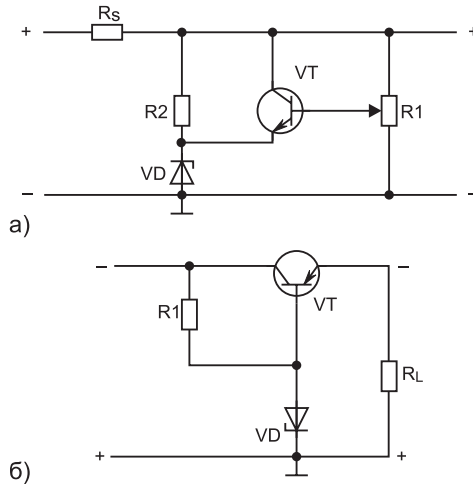


Рис. 77. Параллельный (а) и последовательный (б) стабилизаторы с регулирующим транзистором

литроном VD . Когда входное напряжение возрастает, потенциал эмиттера транзистора становится более отрицательным, проводимость транзистора уменьшается, а падение напряжения на нем увеличивается. При уменьшении входного напряжения все указанные зависимости изменяются в обратную сторону.

Более экономичны стабилизаторы импульсного действия. Здесь транзистор работает в ключевом режиме так, чтобы среднее значение выходного напряжения оставалось постоянным.

Выпускаются и стабилизаторы в микросхемном исполнении (например, типа К142ЕН), которые используются как в отдельности, так и в составе более сложных схем с усилителями, защитой и пр. (например, стабилизатор ПО210 в устройстве ЯРЭ-2201).

4.6.8.6. Блоки питания. Выходное напряжение блоков питания стабилизируется. В БПТ стабилизация обеспечивается с помощью ПНТ, насыщение которых до известной степени ограничивает рост напряжения. Но так как напряжение может все же нарастать и при насыщении ПНТ, дополнительно устанавливают нелинейные резисторы или включают параллельно с вторичной обмоткой ПНТ конденсаторы для образования феррорезонансного контура.

Блоки БПН содержат промежуточные трансформаторы, предназначенные для электрического разделения цепей оперативного тока и трансформаторов напряжения, а также нормирования выходного напряжения. Стабилизация его достаточно просто осуществляется с помощью дросселей насыщения, но такие стабилизаторы инерционны, громоздки и неэкономичны. Этих недостатков лишены тиристорные стабилизаторы, которые, однако, искажают форму кривой напряжения и потому требуют применения сглаживающих фильтров, вносящих свою долю инерционности.

Надежность питания от выпрямительных блоков характеризуется значениями тока $I_{н,р}$ и напряжения $U_{н,р}$ надежной работы, которые для блоков БПТ

и БПН задаются изготовителем. Надежность питания от комбинированных блоков оценивается по их входной характеристике — зависимости напряжения от тока, который надо подать соответственно на БПТ и на БПН, чтобы выходное напряжение было не ниже допустимого (0,80—0,85 номинального). Предельная входная характеристика представляет собой прямоугольник со сторонами $I_{н.р}$ и $U_{н.р}$. Ток на входе блока, при котором выходное напряжение равно минимально допустимому, называют *током надежной работы* блока.

Блоки питания *серии БП11* рассчитаны на питание нагрузки мощностью до 50 Вт. Блок содержит феррорезонансный стабилизатор и однофазный выпрямитель (мостик Греча). Обмотки ПНТ выполнены с отпайками. Уставки на ток наступления резонанса составляют 5; 7,5 и 10 А. Ток наступления феррорезонанса измеряют при плавном увеличении первичного тока ПНТ, без нагрузки. Момент наступления резонанса определяют по резкому броску напряжения на выходе БП.

Длительно допускаемый первичный ток 9,5 А. При этом значении тока в последовательно соединенных обмотках ток нагрузки блока не должен превышать 0,10, 0,20 и 0,35 А при номинальном выходном напряжении соответственно 220, 110 и 24 В.

Блоки питания *БПТ 1002 и БПН 1002*. Блоки рассчитаны на мощность 800—1500 Вт в кратковременном режиме. Блок тока состоит из ПНТ и однофазного выпрямительного моста, феррорезонансный контур образуется с помощью конденсатора и дросселя. В зависимости от нагрузочной способности трансформаторов тока, к которым подключается блок, отдельные секции первичной обмотки ПНТ соединяются последовательно посредством переключателей. Вольт-амперная характеристика трансформатора тока сравнивается с вольт-амперной характеристикой ненагруженного блока, снятой со стороны входа. Число витков первичной обмотки ПНТ выбирается таким образом, чтобы вольт-амперная характеристика трансформатора тока проходила выше вольт-амперной характеристики блока при токах больше 5 А.

Длительно допустимый ток нагрузки 7 А для работы на уставке номинального выходного напряжения 110 В и 3,5 А — для 220 В. При плавном увеличении тока в первичной обмотке и отсутствии нагрузки на выходе блока феррорезонанс наступает при МДС 840 ± 100 АВ.

Блок напряжения состоит из трехфазного трансформатора и двух выпрямительных мостов Ларионова, которые соединяют параллельно или последовательно для получения выходного напряжения 110 или 220 В. Номинальные входные напряжения от 100 до 440 В. При номинальном напряжении потребление блока не превышает 25 В · А на фазу при отсутствии нагрузки; 1500 В · А при нагрузке 5 и 20 Ом (уставки выходного напряжения 110 и 220 В соответственно); 750 В · А при нагрузке 10 и 40 Ом (110 и 220 В). При напряжении 110 % номинального длительный ток нагрузки не должен превышать 6,4 А (110 В) или 3,2 А (220 В).

Блоки питания *стабилизированного напряжения БПНС-2*. На входе блока установлен трехфазный трансформатор, обмотки которого могут быть соединены по схеме треугольник—звезда или звезда—звезда. Выходная мощность блока: номинальная длительно допустимая — 1000 Вт, в течение 30 с — 1800 Вт. Блок обеспечивает напряжение на выходе в пределах 0,85—1,1 номи-

нального значения (220 В) и имеет два исполнения: со сглаживающим фильтром и без него.

Блок содержит трехфазный магнитный усилитель с отрицательной обратной связью по напряжению выхода. Этот усилитель и схема на стабилитронах осуществляют стабилизацию выходного напряжения блока.

Блоки *питания и заряда БПЗ-401, БПЗ-402*. Эти устройства могут использоваться как для питания оперативных цепей защиты непосредственно, так и для заряда конденсаторов, используемых в качестве источников питания электромагнитов приводов и реле.

Блок БПЗ-401 состоит из промежуточного трансформатора напряжения и выпрямительного моста на выходе, блок БПЗ-402 — из промежуточного насыщающегося трансформатора тока и выпрямительного моста. Оба блока содержат на выходе резистор, через который можно подключать батареи конденсаторов для медленного заряда. Одновременное использование блока в качестве зарядного и блока питания возможно только при малой нагрузке по оперативным цепям, в противном случае технические характеристики блоков не гарантируются.

Номинальное напряжение заряда конденсаторов — 400 В; потребляемая мощность при длительно допустимой нагрузке 200 Вт (БПЗ-401) или 550 Вт (БПЗ-402); МДС наступления резонанса 1020 ± 100 А; уставки по току от 4,65 до 17 А; номинальное выходное напряжение 110 или 220 В (при уставке 110 В функции заряда не выполняются).

Блоки конденсаторов. Как правило, от одного зарядного устройства заряжаются несколько групп (блоков) конденсаторных батарей. Чтобы при разряде одной из них остальные не разряжались, осуществляют контактное или диодное разделение групп конденсаторов. Согласно первому методу каждая группа заряжается через размыкающий контакт выходного реле, а разряжается через его замыкающий контакт. При диодном разделении каждая группа подключается к зарядному устройству через силовые диоды, которые и препятствуют одновременному разряду нескольких блоков конденсаторов. Преимущественное распространение получили диодные схемы как более простые и надежные.

Раздел 4

НАЛАДКА УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

1. Испытательная аппаратура

1.1. Регулирование электрических параметров

1.1.1. Регулирование тока.

Устройства для регулирования тока должны обеспечивать:

- а) непрерывное изменение значения тока в заданных пределах;
- б) поддержание неизменным установленного значения тока независимо от изменения температуры элементов схемы или параметров нагрузки в ходе испытаний, например, от изменения индуктивности обмотки реле переменного тока при перемещении сердечника;
- в) выполнение особых требований, диктуемых спецификой проверяемых реле, как то: практически синусоидальная форма кривой испытательного тока, малый угол (обычно до 3 град. эл.) фазного сдвига между напряжением питания и током в обмотке реле и др.

1.1.1.1. Регулирование с помощью резисторов. Наиболее универсальными устройствами являются схемы с регулируемыми резисторами, применение которых, однако, ограничивается трудностью подбора резисторов на большие токи. Простейшая схема рис. 1а пригодна лишь для токов до 5—10 А, посредством комбинированной схемы рис. 1б можно регулировать токи порядка 50 А. В обеих схемах плавное регулирование производится реостатом R , а резистор R_0 исключает возможность короткого замыкания при переводе движка реостата R в одно из крайних положений (левое по схеме рис. 1б).

Сопротивление резисторов R_1, R_2, \dots, R_N подбирается так, чтобы максимальное значение тока на каждой ступени регулирования по крайней мере в 1,2—1,3 раза превышало то минимальное его значение, которое может быть получено на следующей ступени регулирования. Отношение минимального значения тока к максимальному на первых ступенях регулирования должно быть не более 0,7 с тем, чтобы можно было проверить коэффициент возврата

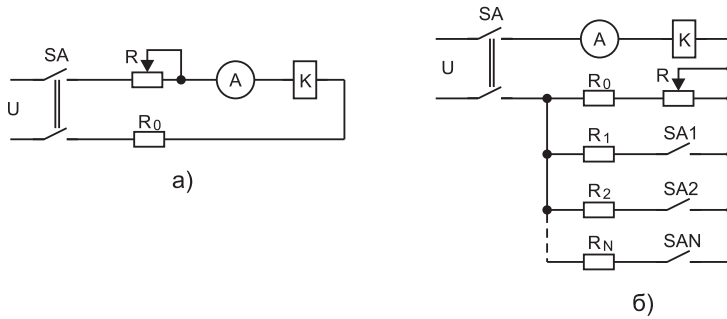


Рис. 1. Схемы регулирования тока с помощью переменных резисторов:
а — простая; б — комбинированная

реле, пользуясь только реостатом R . Для определения тока возврата при больших токах сначала отключают резисторы R_1, R_2, \dots, R_N .

На переменном токе напряжение питания и ток в обмотке реле обычно сдвинуты по фазе на некоторый угол φ_d . При проверке сложных реле (сопротивления, направления мощности и т. п.) угол между векторами тока и напряжения, подводимыми к обмоткам реле, можно оценивать приблизительно, по углу между векторами напряжения на этих обмотках, если дополнительный угол φ_d не превышает $2-3^\circ$, т. е. $\operatorname{ctg} \varphi_d > 19$.

Согласно рис. 2а и 2б, $\operatorname{ctg} \varphi_d = (R + R_p)/x_p$, где R — сопротивление регулировочного реостата, R_p и x_p — активное и индуктивное сопротивления обмотки проверяемого реле. Приняв во внимание, что в каталогах обычно приводится значение полного сопротивления z_p , и считая, что $R + R_d \approx R$, а $x_p \approx z_p$, получим $\operatorname{ctg} \varphi_d \approx R/z_d$, и тогда для $\varphi_d < 3^\circ$ сопротивление реостата можно выбрать по условию $R \geq 20z_p$.

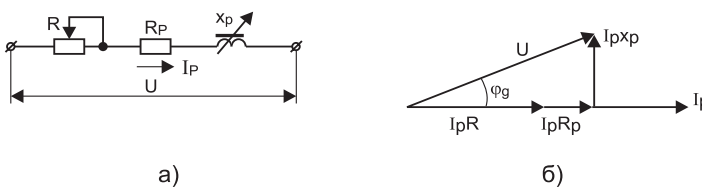


Рис. 2. К определению фазного угла между напряжением питания и током реле:
а — схема замещения; б — векторная диаграмма

Индуктивное сопротивление x_p электромагнитных реле зависит от положения их сердечника (якоря): оно невелико по сравнению с активным сопротивлением R_p при опущенном якоре и становится преобладающим при срабатывании реле. Поэтому полное сопротивление реле близко к активному в начальном положении ($z_n \approx R_p$) и возрастает в несколько раз при подтянутом якоре, приближаясь по значению к индуктивному сопротивлению ($z_k \approx x_p$). Увеличение сопротивления реле приводит к уменьшению тока в цепи (рис. 2а); как следствие, ослабляется притягивание якоря к магнитопроводу, контактная система будет работать нечетко и т. п.

В большинстве случаев трансформаторы тока, питающие реле защит, имеют погрешность не более 10 %. Чтобы условия настройки реле были близки к реальным, снижение тока ΔI при срабатывании реле не должно превышать 5—10 % значения тока I_n , установленного в момент начала срабатывания.

Согласно схеме рис. 2а можем записать:

$$\frac{I_n - \Delta I}{I_n} = \frac{R + R_p}{\sqrt{(R + R_p)^2 + X_p^2}}$$

и

$$\Delta I = I - \frac{1}{\sqrt{1 + X_*^2}},$$

где $X_* = \frac{X_p}{R + R_p}$.

На рис. 3 построена кривая зависимости $X_* = f(\Delta I)$, по которой находят X_* для любого заранее заданного значения ΔI .

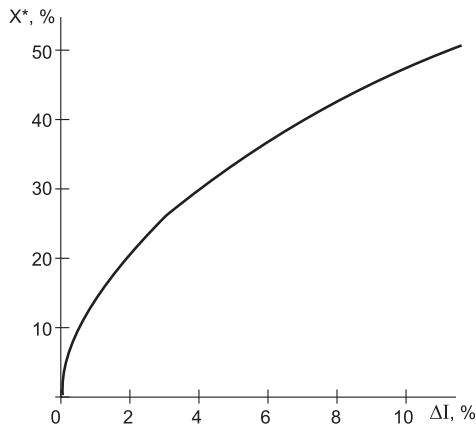


Рис. 3. Зависимость $X_*(\Delta I)$

Сопротивление реостата R рассчитывается по формуле

$$R \geq R_p \left(\frac{m}{X_*} - 1 \right),$$

где $m = z_k/z_n \approx X_p/R_p$ — кратность изменения сопротивления реле. Значения m и R_p находят из каталога или опытным путем.

Обычно задаются уменьшением тока на 3—5 %, а при больших токах, например, при проверке реле РТВ в независимой части характеристики, допускают их уменьшение на 10 %. У реле РТВ, в частности, $m = 2$, $R_p = 2$ Ом и для $\Delta I = 5 \%$ будем иметь $X_* = 0,33$ (рис. 3) и $R \geq 2(2/0,33 - 1) = 10$ Ом, выбрав же

$\Delta I = 10 \%$, получим $x^* = 0,48$ и $R \geq 6,3$ Ом. Учитывая, что ток срабатывания этого реле составляет около 5 А, можно видеть, что напряжение питания цепи тока должно быть не менее 60 В в первом случае и 42 В — во втором. Следовательно, часто применяемые на практике понижающие трансформаторы с вторичным напряжением 36 В и ниже при испытании таких реле не позволяют обеспечить стабильность тока в требуемых пределах. Если другие источники питания отсутствуют или использование их затруднено, можно рекомендовать включение двух понижающих трансформаторов с последовательным соединением их вторичных обмоток.

Реостаты следует выбирать так, чтобы плотность тока в обмотке была небольшой и сопротивление ее незначительно изменялось с нагревом. Это условие особенно актуально для проводниковых сплавов с высоким удельным сопротивлением, имеющих высокий температурный коэффициент.

Характеристики многих реле зависят от формы кривой тока, протекающего по обмотке реле, т. е. от наличия в токе высших гармоник. Так, питание несинусоидальным током вызывает вибрацию якоря реле РТ40, изменение тока срабатывания и выдержки времени реле РТ80 и пр. Источниками высших гармонических в токе могут быть:

а) источники питания схемы проверки. Значительно искажаются фазные напряжения, особенно из-за наличия третьей гармоники, в связи с чем рекомендуется по возможности использовать линейные напряжения;

б) насыщение стальных магнитопроводов реле;

в) нелинейность внутреннего сопротивления регулятора тока; влияние ее наиболее эффективно ослабляется в схеме с резисторами.

Для подавления гармоник, обусловленных насыщением магнитопровода реле, сопротивление регулировочного резистора должно быть в 3—10 раз больше сопротивления реле, причем меньшие значения относятся к реле типа РТ (ИТ) и т. п., большие — к реле с насыщающимися трансформаторами (РНТ, ДЗТ и др.).

1.1.1.2. Применение нагрузочных трансформаторов. Для регулировки тока часто применяются автотрансформаторы, нагрузочные трансформаторы (рис. 4). При этом магнитопровод нагрузочного трансформатора ТЛ не должен насыщаться, т. е. он должен работать на линейном участке характеристики намагничивания во всем диапазоне токов нагрузки. Нагрузочные трансформаторы с линейным внутренним сопротивлением можно использовать без добавочных резисторов только для проверки реле с ненасыщающимся магнитопроводом (ЭТ, РТ40), для реле с насыщающимися магнитопроводами и с

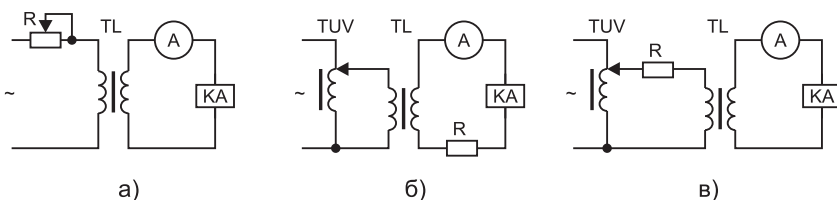


Рис. 4. Схемы проверки реле с нагрузочными трансформаторами

быстронасыщающимися трансформаторами (РТ80, РНТ565 и т. п.) это недопустимо.

Схема на рис. 4 проста и удобна, но ее нагрузочные возможности ограничиваются сравнительно небольшой мощностью широко применяемых реостатов с сопротивлением 50—100 Ом на ток 3—5 А. Схемы с автотрансформатором на ток 9—10 А позволяют получить на вторичной стороне достаточно распространенных трансформаторов типа ОСО-0,25 (250 Вт) напряжением 220/12 В ток до 100—200 А (рис. 4б, в). С точки зрения качества регулирования, гармонического состава тока безразлично, в какую цепь трансформатора — первичную (ВН) или вторичную (НН) — включать балластный резистор R . Нужно только иметь в виду, что сопротивление резистора R , устанавливаемого на стороне ВН (рис. 4в), должно быть в n_T^2 раз больше, чем сопротивление резистора той же мощности на стороне НН (рис. 4б), где n_T — коэффициент трансформации ТЛ. Так, сопротивление на стороне 220 В должно быть больше сопротивления на стороне 12 В в $(220/12)^2 = 336$ раз, или в 37 раз больше, чем на стороне 36 В.

1.1.1.3. Получение больших токов. Тиристорные регуляторы.

Описанные выше аппаратные средства позволяют получать и регулировать токи, достаточные для проверки отдельных вторичных реле. Однако при проверке схем релейной защиты путем имитации аварийных режимов требуется пропускать по шинам подстанции первичные токи порядка 1000 А и более. Малогабаритные нагрузочные трансформаторы на такие токи промышленностью серийно не выпускаются, поэтому пусконаладочные и энергоэксплуатационные предприятия изготавливают их собственными силами.

Обычно в качестве магнитопровода используют ленточные или тороидальные сердечники общим (если их несколько) сечением 30—50 кв. см. Первичная (сетевая, на 220 или 380 В) обмотка состоит из 100—300 витков, вторичная выполняется в виде одного или нескольких витков кабеля или шины. Вторичная ЭДС трансформатора составляет 2—4 В, масса — до 30 кг.

Необходимо подчеркнуть, что если при использовании нагрузочных трансформаторов небольшой мощности максимальное значение вторичного тока ограничивается внутренним сопротивлением трансформатора, то при получении больших токов преобладающее значение может иметь сопротивление внешних соединений. Здесь важно отметить также и то, что индуктивное сопротивление медных проводов большого сечения (100 кв. мм и выше) оказывается больше, чем активное. Так, например, активное сопротивление 1 м прямого и обратного проводов из меди сечением 200 кв. мм будет 0,17 мОм, индуктивное же сопротивление этих проводов, расположенных на расстоянии 0,3 м друг от друга, составит 0,45 мОм (рис. 5), а полное 0,49 мОм. В этих условиях нельзя получить ток больше 4 кА от трансформатора с вторичным напряжением 2 В, даже если не считаться с его внутренним сопротивлением, и основной возможностью повышения тока остается сокращение длины соединительных проводов. Действительно, увеличение сечения проводов не даст ощутимого эффекта, а повышение напряжения путем увеличения количества витков вторичной обмотки приведет к возрастанию внутреннего сопротивления трансформатора.

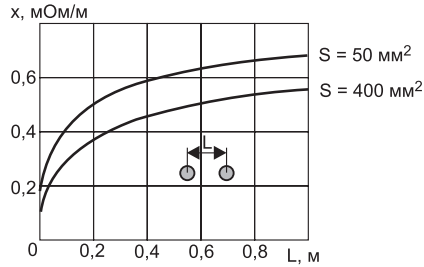


Рис. 5. Индуктивное сопротивление двух проводов

Таким образом, для получения возможно больших значений тока от данной нагрузочной установки необходимо выполнить следующие рекомендации:

- 1) приблизить, насколько возможно, нагрузочный трансформатор к шинам, а соединительные провода друг к другу;
- 2) сечение проводников вторичной обмотки трансформатора и соединительного кабеля должно быть возможно большим;
- 3) обеспечить надежные контактные соединения в цепи нагрузки (с помощью зажимов, струбцин и т. п.).

Ток в первичной обмотке нагрузочных трансформаторов может достигать достаточно больших значений, намного превышающих допустимый ток ЛАТРа. Так, например, при вторичном токе 10 000 А и коэффициенте трансформации 100 нагрузочного трансформатора первичный ток последнего превысит 100 А. Силу тока такого порядка можно регулировать с помощью:

- а) автотрансформаторов;
- б) жидкостных реостатов;
- в) полупроводниковых регуляторов.

С технической точки зрения применение автотрансформаторов является наилучшим способом, но ограничивается тем, что они тяжелы и громоздки. Так, масса автотрансформатора типа АОНН-40-220 на ток 40 А составляет 70 кг. Полезно иметь в виду (особенно при настройке токовой отсечки), что в кратковременном режиме автотрансформаторы могут быть значительно перегружены: например, регулятор РНО-250-10 с номинальным током 40 А допускает ток 180 А в течение 1 мин; при этом подвижный контакт должен быть надежно зафиксирован и перемещать его под нагрузкой нельзя.

Жидкостные реостаты в одно- или трехфазном исполнении состоят из сосуда с подсоленной или подкисленной водой, в котором расположены электроды из меди, латуни, оцинкованной стали и пр. Нагрузка регулируется изменением площади электродов, погружаемых в электролит, или расстоянием между ними. При всей простоте их конструкции жидкостные реостаты не нашли широкого применения в связи с тем, что они требуют отдельного изготовления, а также имеют нестабильное сопротивление.

В ряде случаев оптимальным решением является применение полупроводниковых (тиристорных) регуляторов, сравнительно легких и малогабаритных, которые к тому же могут быть изготовлены на любую силу тока. Единственным серьезным препятствием к их широкому использованию является искажение формы кривой тока. Авторы, впервые в наладочной практике собравшие и применившие их для проверки РЗА в конце 60-х годов, опытным и

расчетным путем показали, что тиристорные регуляторы можно использовать для испытания электромагнитных реле при условии, если угол регулирования не превышает 90° , а измерения производятся аналоговыми приборами, непосредственно реагирующими на среднеквадратичное (действующее) значение тока (приборы электромагнитной или электродинамической системы), или цифровыми приборами, вычисляющими среднеквадратичное значение тока при любой форме сигнала. Вместе с тем тиристорные регуляторы принципиально неприменимы для проверки тех защит, для которых форма тока имеет существенное значение, например, дифференциальных.

Силовая часть тиристорного регулятора содержит два встречно-параллельных тиристора или симистор. Простейшую схему фазового управления вентилями можно осуществить с помощью RC-цепи. Более совершенные схемы строятся на цифровых или аналоговых микросхемных элементах. В ряде конструкций предусматривается запоминание и автоматическое отключение тока при срабатывании защиты, а также стабилизация тока уставки.

Удачный вариант комплекта для испытания максимальных токовых защит разработала и изготавливает Ассоциация наладочных организаций (г. С.-Петербург). В состав комплекта входят силовой блок (НТИ-1), включающий нагрузочный и измерительный трансформаторы, и пульт управления (РТ-2048М). Предусмотрено два режима работы: кратковременный (импульсный) с диапазоном времени протекания тока $0,02$ — $1,6$ с и длительный. Максимальный испытательный ток (действующее значение) в импульсном режиме 1000 А, в длительном — до 600 А; максимальный ток, потребляемый из сети, — 20 А. Сила тока измеряется встроенным цифровым индикатором с погрешностью не более 5% . Масса силового блока $5,5$ кг, пульта управления — 1 кг.

Высокие технические характеристики имеют нагрузочные установки, предлагаемые рынком электротехнической промышленности, однако возможность их приобретения и использования ограничивается ценой продукции. Так, система испытания первичным током Oden AT (компания «Пергам») обеспечивает получение нагрузочного тока до 22 кА, а также измерение электрических параметров (тока, напряжения, сопротивления, мощности, $\cos \phi$), времени и др. Конструктивное исполнение — блочное, масса каждого блока до 30 кг; масса полного комплекта более 100 кг, цена $26\,000$ долл.

Регулируемое напряжение постоянного тока можно получить с помощью устройств переменного тока с выпрямителями на выходе. В большинстве случаев (особенно при индуктивной нагрузке, зарядке аккумуляторов и пр.) пульсация выходного напряжения существенного значения не имеет. Надо только иметь в виду, что из-за падения напряжения на вентиллях вторичное напряжение нагрузочного трансформатора должно быть на 1 — 2 В выше, чем для получения того же значения переменного тока.

1.1.2. Регулирование напряжения.

Устройства для регулирования напряжения должны обеспечивать:

- а) плавное и непрерывное изменение значения напряжения в необходимых пределах;
- б) поддержание неизменным установленного значения напряжения независимо от изменения температуры элементов схемы или от изменения параметров нагрузки в процессе испытаний;

в) правильную синусоидальную форму напряжения;

г) при проверке реле, характеристика которых зависит от угла между векторами электрических величин, подводимых к его обмоткам, — угол сдвига между векторами напряжения питания и напряжения на обмотке реле не больше 3° .

Для регулирования переменного напряжения широко применяются лабораторные автотрансформаторы (рис. 6). Простейшая схема включения (рис. 6а) позволяет с помощью автотрансформатора TUV изменять напряжение на нагрузке (реле напряжения KV) в диапазоне от 0 до 250 В. Минимальное изменение напряжения получается при перемещении ползунка на один виток обмотки. Автотрансформатор ЛАТР-1 имеет 250 витков и, следовательно, дискретность напряжения составляет 1 В/виток, у ЛАТР-2 дискретность 0,45 В/виток, так как число витков его обмотки — 550. Если такая точность регулируемого напряжения представляется недостаточной, то его подают на другой ЛАТР или потенциометр. Для обычных промежуточных реле и электромагнитов достаточна точность регулирования 0,5—1 % номинального напряжения.

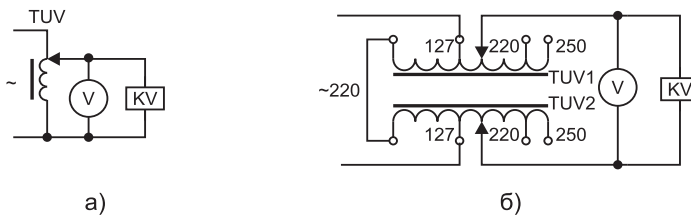


Рис. 6. Схемы регулирования напряжения с помощью автотрансформаторов: а — с одним автотрансформатором; б — с двумя автотрансформаторами

С помощью двух автотрансформаторов можно получить регулируемое напряжение от 0 до 430 В по схеме рис. 6б или по аналогичной схеме, подав напряжение 380 В на выводы 220 В. Последний вариант обеспечивает синусоидальность выходного напряжения, так как линейное напряжение не содержит высших гармонических. Посредством трех автотрансформаторов можно регулировать трехфазное напряжение 430/250 В.

Для регулирования напряжения переменного и постоянного тока применяют переменные резисторы, реостаты, включаемые по схеме потенциометра (рис. 7). Схема включения потенциометра на рис. 7а — самая простая, анало-

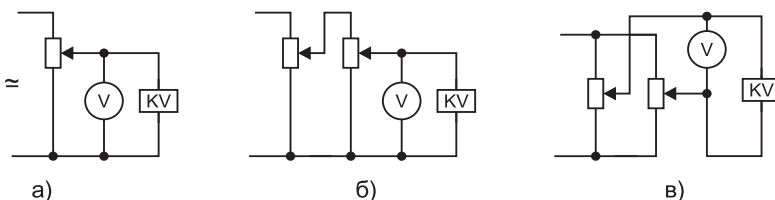


Рис. 7. Схемы регулирования напряжения с помощью потенциометров: а — с одним потенциометром; б — с двумя потенциометрами; в — с реверсированием напряжения

гична схеме рис. 3. По схеме рис. 7б одним потенциометром осуществляют «грубое», другим — «тонкое» регулирование напряжения. Схема на рис. 7в обеспечивает изменение полярности (реверсирование) выходного напряжения без разрыва цепи.

Выбирая резисторы для схемы с потенциометром, надо учитывать ее характерные особенности (см. рис. 8). Во-первых, потенциометр, как и автотрансформатор, дает дискретную, мелкоступенчатую регулировку. Точность ее определяется числом витков обмотки потенциометра, по которой движется щетка или ролик. Так как обычно ширина щетки значительно больше диаметра проволоки обмотки, часть витков щеткой шунтируется и напряжение на виток несколько увеличивается. Кроме того, токосъемник часто не доходит до конца обмотки и часть витков ее не используется. По этим причинам расчетное число витков потенциометра следует увеличивать на 10—20 % против полученного из условия обеспечения требуемой точности регулирования. Точность регулирования можно повысить посредством второго потенциометра по схеме рис. 7б или включив последовательно с потенциометром постоянные добавочные резисторы с обеих его сторон. Включая или отключая эти резисторы, можно сдвигать область регулирования в сторону больших или меньших значений напряжения.

Во-вторых, та часть R_2 делителя (рис. 8а), к которой не подключена нагрузка Z_H , обтекается общим током I_2 , равным сумме токов собственного потребления резистора R и тока нагрузки I_H . Если нагрузка такова, что при одном и том же положении движка потенциометра сопротивление ее может изменяться (например, при срабатывании реле или электромагнита), то с током I_H изменится и падение напряжения $I_2 R_2$ и, следовательно, напряжение на нагрузке U_H . Чтобы снизить влияние нагрузки на испытательное напряжение, сопротивление делителя R выбирают примерно на порядок (в 5—10 раз) меньше сопротивления нагрузки Z_H .

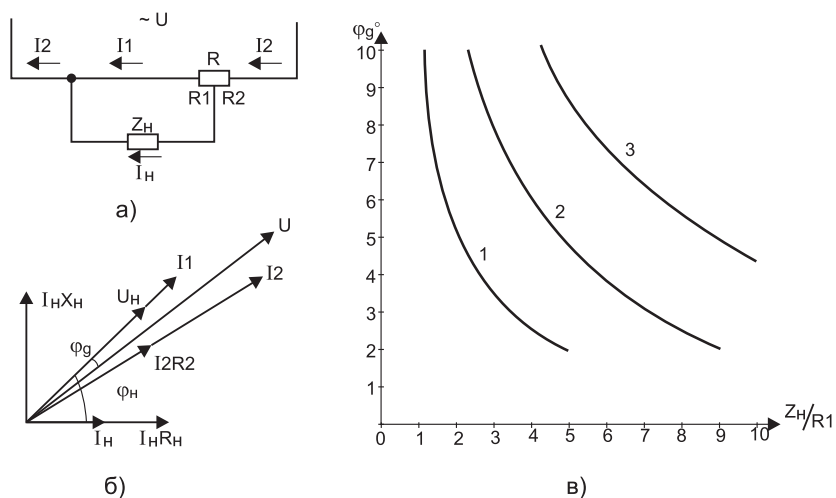


Рис. 8. К схеме регулирования напряжения потенциометром: а — эквивалентная электрическая схема; б — векторная диаграмма; в — зависимость $\varphi_d = f(Z_H/R_1)$

В-третьих, при указанном условии ток I_2 получается существенно больше, чем ток I_n , и выбирать реостат по току следует именно по значению тока I_2 . Полезно иметь в виду, что силовые резисторы, и ползунковые реостаты в частности, имеют большую тепловую инерцию и в кратковременном режиме выдерживают определенную перегрузку, в связи с чем могут быть выбраны на номинальный ток, меньший I_2 . В любом случае изменение сопротивления резисторов от нагрева не должно искажать результатов проверки.

Наконец, когда проверяются реле переменного тока со значительной индуктивностью, напряжение на нагрузке U_n сдвигается относительно напряжения питания U на некоторый фазный угол φ_d (рис. 8б). Чтобы можно было без существенной погрешности в настройке сложных реле определять фазный угол обмотки по углу между векторами напряжения питания потенциальных и токовых цепей реле, угол φ_d не должен превышать $2\text{--}3^\circ$. При построении векторной диаграммы рис. 8б вектор тока I_2 получен как сумма векторов I_1 и I_n , а вектор напряжения питания U — как сумма векторов U_n и $I_2 R_2$.

На рис. 8в построена зависимость дополнительного угла φ_d от соотношения сопротивлений нагрузки и рабочей части потенциометра для различных значений внутреннего угла нагрузки φ_n . Задавшись допустимым значением угла φ_d и зная фазный угол φ_n , находят по одной из кривых отношение z_n/R_1 . Отсюда, зная или измерив сопротивление нагрузки z_n , определяют сопротивление R_1 рабочей части реостата и далее рассчитывают его полное сопротивление $R = R_1 + R_2$ из выражения $R/R_1 = U/U_n$.

1.1.3. Регулирование угла сдвига фаз.

При наладке РЗ требуется обычно изменять угол между векторами тока и напряжения в трех основных случаях:

- 1) установка и поддержание неизменным заданного значения угла, например, для направленного реле сопротивления;
- 2) изменение угла степенями через $30\text{--}60^\circ$, например для снятия угловой характеристики направленных реле;
- 3) точная установка и плавное регулирование угла в небольших пределах, например при определении угла перемены знака момента реле направления.

Универсальным аппаратным средством для выполнения этих функций является так называемый индукционный регулятор (потенциал — регулятор) — заторможенный асинхронный двигатель с фазным ротором. Особенность его состоит в том, что при изменении угла поворота ротора относительно статора от 0 до 360° в тех же пределах изменяется угол между напряжениями статора и ротора. Однако некоторые модификации обеспечивают изменение угла лишь в пределах $\pm 90^\circ$. Кроме того, эти электрические машины даже небольшой мощности тяжелы и громоздки. Могут использоваться также поворотные трансформаторы и автотрансформаторы.

Когда допустимо изменение угла степенями, удобно использовать трехфазное напряжение. Подавая различные линейные напряжения на цепи тока и напряжения, можно получить 6 разных значений угла между соответствующими векторами от 0 до 360° через 60° , а используя дополнительно и фазные напряжения, — через 30° . Ниже указан вариант подключения фаз сети к одной

из цепей тока или напряжения при условии, что другая цепь подключена на напряжение А0.

| | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Угол, град. эл. | 0 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 | 330 |
| Фаза | A0 | AB | 0B | CB | C0 | CA | 0A | BA | B0 | BC | 0C | AC |

Необходимую коммутацию напряжений нетрудно осуществить с помощью двух однополюсных переключателей на четыре направления (рис. 9) или одного сдвоенного переключателя. При необходимости такой фазорегулятор дополняется потенциометром (или автотрансформатором), с помощью которого можно плавно изменять значение угла от 0 до 60° в пределах одной ступени (рис. 10а). Но из векторной диаграммы рис. 10б видно, что при регулировании выходное напряжение изменяется не только по фазе, но и по значению: в крайних положениях движка потенциометра оно равно линейному, в среднем положении — в 1,15 раз меньше.

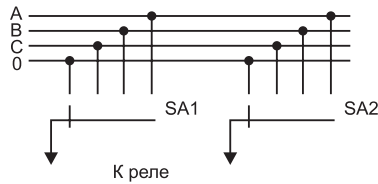


Рис. 9. Ступенчатое изменение угла с помощью двух переключателей

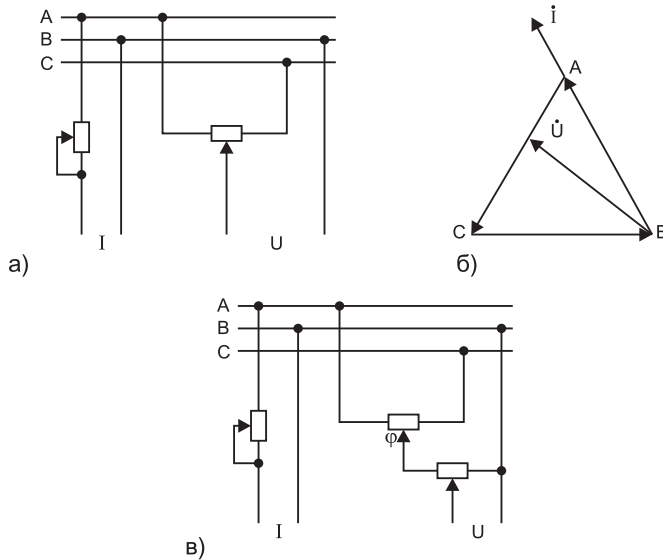


Рис. 10. Плавное изменение угла между током (I) и напряжением (U) в пределах 0—60° с помощью потенциометров: а — схема с одним потенциометром; б — векторная диаграмма к схеме с одним потенциометром; в — схема с двумя потенциометрами

Для исключения этого недостатка можно применить схему с двумя потенциометрами (рис. 10в): здесь одним потенциометром устанавливают угол, другим корректируют значение напряжения. Во всех схемах вместо потенциометров можно использовать автотрансформаторы.

1.2. Испытание электрической изоляции переменным напряжением

Испытание вторичных цепей и аппаратов постоянного, переменного и импульсного тока следует производить напряжением 1000 В промышленной частоты, практически синусоидальной формы (с коэффициентом амплитуды $\sqrt{2} \pm 7\%$), в течение 60 ± 5 с. Это испытание проводят с помощью специального аппарата или схемы, собираемой на месте испытаний. Испытательная установка содержит обычно повышающий трансформатор, источник регулируемого напряжения, защитные блокировки и средства измерения (рис. 11).

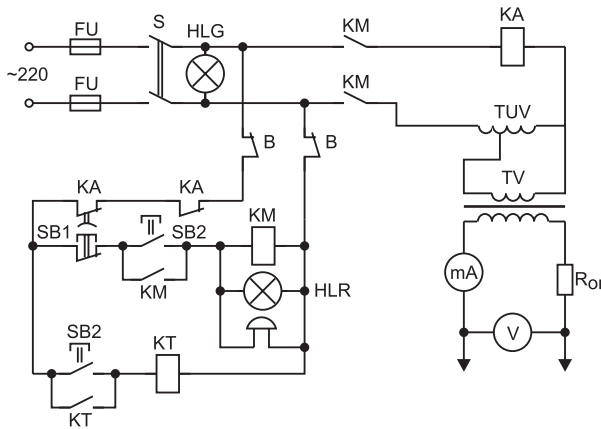


Рис. 11. Схема установки для испытания электрической прочности изоляции напряжением 1000 В

Мощность испытательного трансформатора TV должна быть не менее $0,5 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, но при условии контроля тока утечки (миллиамперметр mA) может быть снижена до $200\text{—}300 \text{ В} \cdot \text{А}$. При отсутствии трансформатора специального изготовления может быть использован измерительный трансформатор напряжения типа НОМ-3 или аналогичный. Для испытания отдельных аппаратов и цепей часто оказывается достаточной мощность $20\text{—}30 \text{ В} \cdot \text{А}$.

Регулирование напряжения должно быть достаточно плавным (ступени не более 5%), что достигается применением автотрансформаторов (TUV) или потенциометров. Регулятор должен обеспечивать достижение $1,1\text{—}1,2$ максимального испытательного напряжения. Резистор $R_{\text{ор}}$ служит для ограничения тока до $50\text{—}60 \text{ мА}$ и уменьшения тем самым размеров повреждения изоляции при пробое; иногда сопровождающий ток ограничивают до 10 мА . Дальнейшее уменьшение тока может затруднить фиксацию момента пробоя или перекрытия изоляции.

Блокировочные контакты В в цепи обмотки пускателя КМ, подающего питание на автотрансформатор ТУВ и испытательный трансформатор TV, не допускают проникновения внутрь установки при включенном испытательном трансформаторе. Реле времени КТ отключает схему после истечения заданного времени приложения напряжения 1000 В (1 мин), а токовое реле КА — при повреждении. Зеленая сигнальная лампа НLG загорается при подаче напряжения сети, красная НLR — при включении пускателя КМ.

Измерять испытательное напряжение удобно вольтметром электромагнитной или электродинамической системы. При отсутствии вольтметра на 1000 В можно соединить последовательно два однотипных вольтметра на 500 В. Инструментальная погрешность измерения не должна превышать 3 %. За испытательное напряжение следует принимать его действующее значение. Для контроля формы кривой напряжения можно воспользоваться амплитудным вольтметром, показания которого, деленные на $\sqrt{2}$, не должны отличаться от показаний измерительного вольтметра более чем на 7 %.

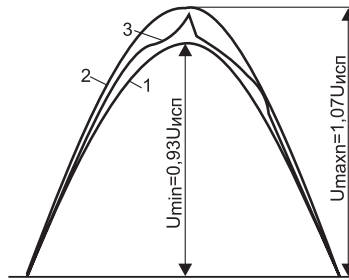


Рис. 12. Контроль формы испытательного напряжения:
1, 2 — синусоиды, 3 — кривая на экране осциллографа

Форму кривой испытательного напряжения можно проконтролировать также с помощью электронного осциллографа. Для этого на листе прозрачной бумаги изображают две синусоиды, амплитуды которых отличаются на 14 %. Бумагу накладывают на экран осциллографа, и синусоиду с наибольшей амплитудой совмещают с кривой на экране: при нормальной форме последней она не должна выходить за границы нарисованных синусоид (рис. 12).

1.3. Комплектные переносные испытательные установки

1.3.1. Устройство УПР-3. Для облегчения испытаний и настройки устройств РЗА, смонтированных на релейных щитах или в РУ электроподстанций, целесообразно использовать переносные устройства, содержащие необходимую для этого аппаратуру. Различные конструкции комплектных испытательных устройств разработаны в пусконаладочных и эксплуатационных организациях. Схема одного из самых несложных устройств типа УПР-3 (Электроцентромонтаж) для проверки простых реле (времени, напряжения,

промежуточных и сигнальных реле) на постоянном и переменном токе представлена на рис. 13.

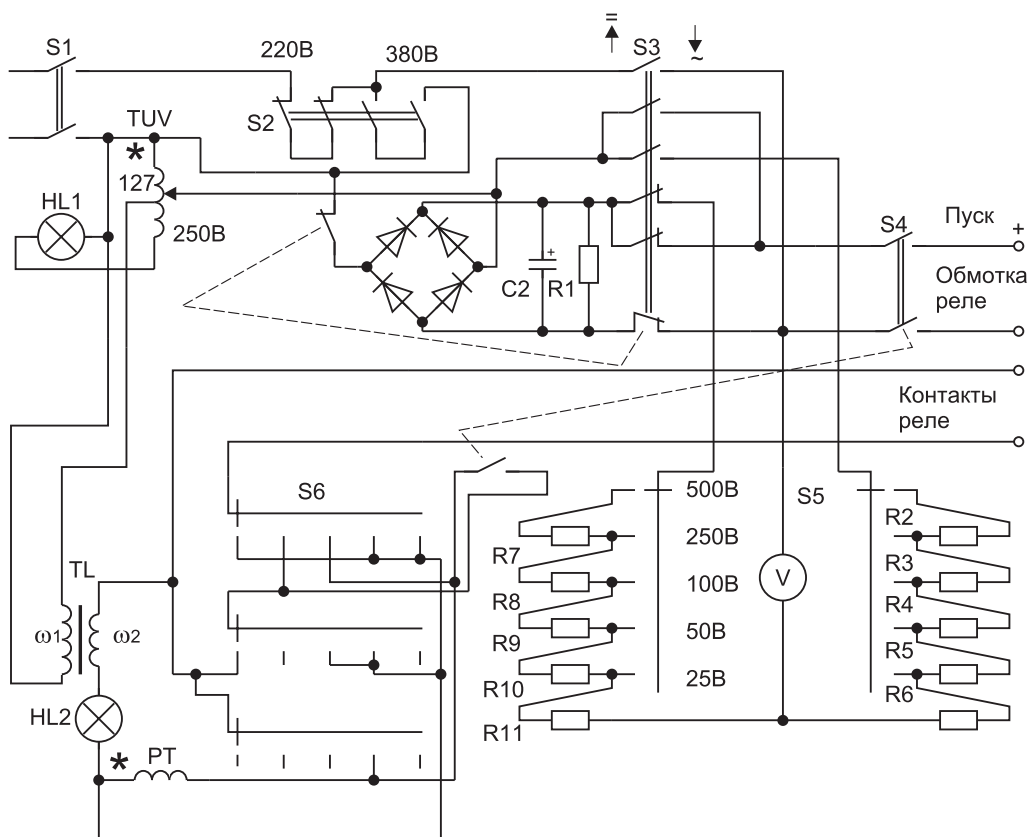


Рис. 13. Принципиальная электрическая схема комплектного испытательного устройства УПР-3

Устройство состоит из регулировочного автотрансформатора TUV, разделительного трансформатора TL для секундомера PT, схем включения секундомера и вольтметра и переключателей S1—S6.

Автотрансформатор TUV обеспечивает регулирование выходного напряжения переменного тока от 0 до 380 В по оригинальной схеме. Здесь автотрансформатор (ЛАТР-2М) включается, как обычно, на фазное напряжение, а регулируется напряжение либо от 0 до 220 В между движком и фазным проводом, подключенным к обмотке автотрансформатора, либо от 220 до 380 В между движком и проводом другой фазы, не подключенным к обмотке. Повышение напряжения производится вращением рукоятки ЛАТРа: в первом случае — по часовой стрелке, во втором — в обратном направлении.

Вольтметр магнитоэлектрической системы включен через выпрямитель (на рис. 13 не показан), а для возможности использования одной и той же шкалы на постоянном и переменном токе наборы добавочных резисторов выполнены

отдельно: R2—R6 для переменного и R7—R11 — для постоянного тока. Переход с одного набора на другой осуществляется переключателем S3 вместе с изменением рода тока выходных цепей.

Схема измерения времени содержит разделительный питающий трансформатор TL, электросекундомер РТ, сигнальную лампу HL2 и переключатель режима работы секундомера S6, положения которого выбираются в соответствии с типом проверяемых контактов реле.

Тумблером S4 «Пуск» подается напряжение на обмотку испытуемого аппарата и запускается схема измерения времени. Обмотка и контакты аппарата подключаются к одноименным зажимам. Максимально допустимый ток в выходных цепях 2 А.

Масса устройства 8 кг.

1.3.2. Устройство проверки коммутационной аппаратуры УПКА-1 позволяет выполнить следующие операции:

- проверка релейно-коммутационной аппаратуры схем управления, блокировок и сигнализации, за исключением токовых реле;
- включение и отключение выключателя с измерением времени и скорости его работы с помощью вибрографа;
- проверка напряжения срабатывания и возврата контактора включения и электромагнита отключения привода выключателя;
- опробование работы выключателя при пониженном напряжении питания.

Устройство содержит: схему питания постоянным током привода выключателя; схемы регулирования напряжения постоянного и переменного тока; схему измерения времени работы аппаратуры встроенным электросекундомером и измерительный прибор с защитой от перегрузок.

Питание цепей управления может осуществляться от внешнего источника или от шин $\pm EY$ постоянного тока ячейки. В корпус устройства вмонтировано гнездо, аналогичное имеющемуся в ячейке КРУ, в которое вставляется штырь соединительного кабеля выкатной тележки.

Масса устройства 16 кг.

1.3.3. Испытательное устройство типа ИЗТ-3 (ЦЛЭМ Мосэнерго). В него входят следующие элементы:

- потенциометр со ступенчатой двухсекционной обмоткой для включения на напряжение 220 и 110 В постоянного и переменного тока;
- нагрузочный трансформатор с двухсекционной обмоткой; вторичная обмотка также секционирована. Максимальный длительный выходной ток 150 А, кратковременный (до 0,5 мин) — 500 А;
- добавочный резистор для обеспечения синусоидальной формы кривой вторичного тока, разбитый на ступени сопротивлением 1; 6 и 30 Ом с допустимыми токами соответственно 10; 5 и 1 А;
- разделительный трансформатор для питания секундомера и реле для его остановки;
- переключатели для набора требуемой схемы.

Масса комплекта 25 кг.

Устройство предназначено для проверки простых защит, в том числе максимальных токовых, отсечек и т. п. Для проверки более сложных защит (направленных, дистанционных и др.) служит приставка типа ИЗН-3, которая позволяет плавно регулировать напряжение и ступенчато (через 30 или 60°) — угол сдвига фаз между выходным током ИЗТ-3 и напряжением приставки. Масса приставки 10 кг.

1.3.4. Комплектная установка типа У5053. Более полно, чем описанные выше устройства, выполняет функции, требуемые при наладке простых и сложных защит. Устройство состоит из трех отдельных блоков: регулировочного К513, нагрузочного К514 и приставки К515 (рис. 14), каждый из которых может использоваться отдельно:

- блок К513 — как источник с плавно-ступенчатым регулированием переменного напряжения до 380 В и тока до 10 А, выпрямленного напряжения до 240 В и тока до 4,5 А, а также для измерения временных параметров реле;
- блок К514 — как источник однофазного переменного тока до 200 А со ступенчатым регулированием;
- блок К515 — как источник однофазного плавно регулируемого напряжения переменного тока или как источник симметричной системы трехфазного напряжения 100 В.

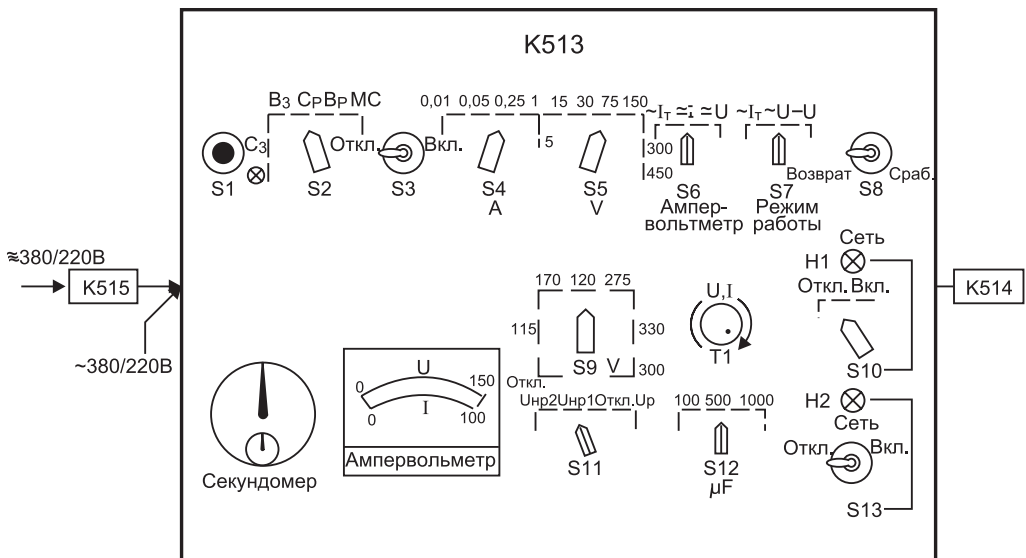


Рис. 14. Комплектная испытательная установка У5053

Блоки К513 и К514 образуют самостоятельное основное комплектное устройство У5052 для проверки простых защит и элементов электроавтоматики. При проверке сложных защит используется как источник однофазного регулируемого тока, при проверке оперативных цепей — как источник регулируемого выпрямленного напряжения.

Устройство У5052 позволяет выполнить следующие операции:

- проверку и настройку уставок реле переменного тока до 200 А по току и до 380 В по напряжению срабатывания;
- прогрузку первичным током защит, проверку коэффициента трансформации трансформаторов тока до 200/5 и 10/1 А. Для проверки реле, у которых форма кривой тока влияет на параметры срабатывания, предусмотрены встроенные резисторы;
- проверку промежуточных реле, реле времени, контакторов постоянного тока на напряжение до 220 В или ток до 5 А;
- определение однополярных выводов обмоток, времени срабатывания и возврата проверяемых аппаратов.

Питание устройства У5052 — от сети переменного тока мощностью не менее 6 кВ · А.

Устройство У5053 в дополнение к указанным функциям обеспечивает:

- определение правильности чередования фаз трехфазной сети;
- имитацию нормального режима работы защит;
- имитацию двухфазного КЗ со сбросом напряжения между поврежденными фазами и одновременной подачей аварийного тока;
- имитацию трехфазного КЗ со сбросом напряжения трех фаз.

Питание устройства У5053 — трехфазное, от источника мощностью не менее 6 кВ · А.

В рабочем положении блок К514 устанавливается на столик-тележку, сверху размещаются блоки К513 и К515.

Взамен устройства У5052, выпускавшегося Киевским заводом «Точэлектроприбор», ООО «Интермикс» (С.-Петербург) реализует устройство типа УНЭП, которое дополнительно обеспечивает регулируемый переменный ток до 1500 А. Индикация — цифровая; масса устройства — 25 кг.

1.3.5. Испытательные установки на базе микропроцессоров. Электромеханические испытательные установки (описанные выше и аналогичные им), хотя и применяются еще при наладке устройств РЗА, к настоящему времени морально устарели и промышленное производство их в России прекращено. Значительно более эффективными являются испытательные установки с применением микропроцессорных и компьютерных узлов, пригодные для проверки как электромеханических релейных устройств с большим потреблением, так и полупроводниковых, включая микропроцессорные. Выпуск таких установок осуществляется за рубежом с начала 80-х годов, в последние годы отечественная промышленность освоила производство аналогичных проверочных устройств, не уступающих лучшим зарубежным образцам.

Микропроцессорные испытательные установки серии «Уран», «Нептун» и «Сатурн» разработаны НПФ «Радиус» с участием АО «Фирма ОРГРЭС».

Установки серии «Уран» предназначены для проверки простых и сложных защит. Установка «Уран-1» состоит из регулировочного и нагрузочного блоков, а «Уран-2» дополнительно содержит блок трехфазного напряжения. Регулировочный блок предназначен для формирования переменного и постоянного (выпрямленного со сглаживанием) напряжения с плавно-ступенчатым

регулированием, выпрямленного (без сглаживания) тока с плавным регулированием и постоянного или переменного напряжения с фиксированным значением в следующих диапазонах:

| | |
|--|----------|
| Переменное напряжение, В | 0,01—410 |
| Переменный ток, А | 0,001—10 |
| Выпрямленное (со сглаживанием) напряжение, В | 0,01—240 |
| Выпрямленный (со сглаживанием) ток, А | 0,001—5 |
| Выпрямленный (без сглаживания) ток, А | 0,01—5 |
| Фиксированное напряжение, В | 110, 220 |

Нагрузочный блок обеспечивает плавно-ступенчатое регулирование переменного напряжения и тока в диапазонах от 0,01 до 500 В и от 0,001 до 200 А.

Блок трехфазного напряжения предназначен для формирования однофазного и трехфазного напряжения и однофазного тока с регулированием частоты, амплитуды и угла сдвига фаз. Однофазное напряжение регулируется в пределах от 0,02 до 200 В, трехфазное — от 0,02 до 70 В (фазное), однофазный ток — от 0,1 до 15 А. Блок обеспечивает также измерение внешних электрических величин в диапазонах: переменного напряжения 0,1—400 В, переменного тока 0,1—25 А, угла сдвига фаз 0—360 град. эл. и сопротивления 0,01—10 Ом.

Ступенчатое регулирование осуществляется переключением числа витков вторичной обмотки регулировочного трансформатора, плавное — с помощью автотрансформатора. Микропроцессорная схема контролирует состояние установки и управляет ее работой в соответствии с программой, записанной в ПЗУ. Требуемые параметры работы вводят с клавиатуры, а результаты наблюдают на жидкокристаллическом индикаторе. Предусмотрена имитация различных видов КЗ.

Возможно как совместное, так и автономное использование блоков. Масса блоков: нагрузочного — 25, регулировочного — 32, блока трехфазного напряжения — до 20 кг.

Испытательная установка «Нептун» — одноблочного исполнения, предназначена для проверки простых защит в сетях напряжением 0,4—35 кВ. Установка обеспечивает возможность плавного изменения напряжения и тока с одновременным измерением их действующих значений или активной мощности, а также измерения временных характеристик проверяемых реле. Диапазоны регулирования напряжения: переменного — от 1 до 250 В, постоянного от 1 до 350 В, переменного тока — от 0,1 до 40 А, измерения времени — от 0,002 до 100 с. Установка «Нептун-2» допускает переменный ток до 100 А.

Микропроцессорный контроллер выполнен на базе однокристалльной микроЭВМ. Значения величин выводятся на жидкокристаллический индикатор. Измерительные датчики тока и напряжения выполнены с использованием эффекта Холла.

Масса установки «Нептун» — не более 16 кг, «Нептун-2» — 20 кг.

Испытательные установки «Сатурн» предназначены для настройки автоматических выключателей и оценки токов КЗ цепи фаза — нуль в сетях 0,4 кВ, а также для проверки характеристик средств РЗА в сетях 6—35 кВ. Установка

«Сатурн-М» — одноблочное, «Сатурн-М1» — двухблочное устройство, состоящее из базового (аналогичного «Сатурн-М») и силового блоков. Установки обеспечивают возможность проверки защит как вторичным, так и первичным током с измерением его действующего значения и времени отключения проверяемого аппарата. Первичный ток может быть получен либо непосредственно от сети 0,4 кВ с помощью регулируемого тиристорного короткозамыкателя, либо от нагрузочного трансформатора (ТН) с регулятором тока в его первичной обмотке.

Диапазоны значений регулируемых величин:

| | |
|---|------------|
| Регулирование и измерение тока в схеме без НТ, А | |
| «Сатурн-М» | 10—2000 |
| «Сатурн-М1» с силовым блоком | 30—12000 |
| Регулирование первичного тока НТ, А 0,5—300 | |
| Измерение тока, А | |
| со встроенным ТА | 10—2500 |
| с внешним ТА | 100—99990 |
| Задание и измерение длительности протекания | |
| тока и времени отключения аппарата, с | 0,01—99,99 |
| Допустимая длительность протекания тока в схеме | |
| без ТН при токе, А | |
| для «Сатурн-М», с | |
| 100 | 100 |
| 500 | 5 |
| для силового блока «Сатурн-М1» | |
| 500 | 40 |
| 2000 | 3 |
| 12 000 | 0,06 |
| Масса каждого блока — не более 16 кг. | |

Работой схемы (рис. 15) управляет процессор МП, который считывает команды из ПЗУ и выполняет их. При включении питания (на рис. 15 не показано) автоматически проверяется исправность основных элементов устройства. При обнаружении неисправности работа устройства прекращается и на индикатор выдается код ошибки. По команде «Пуск» выполняется цикл управления тиристорами и измерения тока. Детектор нуля фазы сети ДНФ обеспечивает прерывание процессора каждые полпериода частоты сети и привязку фазы отпирающего импульса к моменту перехода напряжения через нуль. Процессор записывает в программируемый таймер ПТ число, соответствующее заданному углу отпираания тиристоров VD1, VD2, а формирователь ФИ вырабатывает отпирающие импульсы, подаваемые к тиристорам через импульсный трансформатор ТЛ.

Канал измерения тока содержит трансформатор ТА с коммутируемыми входами для разных пределов, мультиплексор переключения пределов измерения тока МХ с масштабирующим усилителем и двухполупериодным выпрямителем на выходе и микросхему АЦП. Каждые 0,3 мс процессор производит

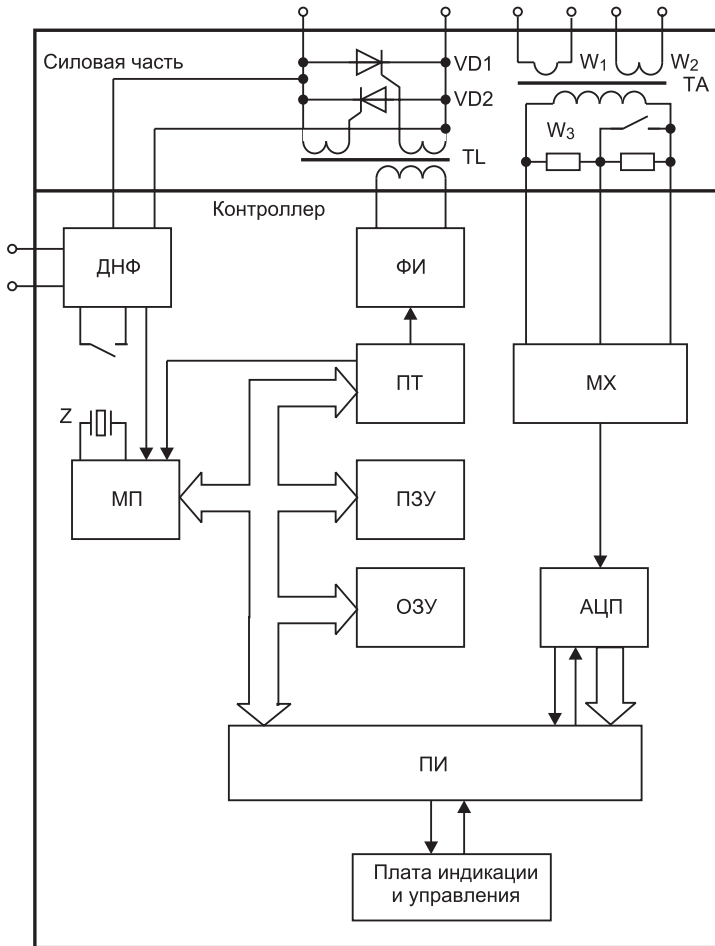


Рис. 15. Структурная схема испытательной установки «Сатурн»

запуск цикла измерения АЦП и считанное значение заносится в ОЗУ. Процессор рассчитывает действующее значение тока за время $\leq 0,2$ с. По заполнении объема памяти ОЗУ (за 0,2 с) измерение тока прекращается, тиристоры же остаются включенными до истечения установленного времени испытания. Ток в пределах 10—2500 А измеряется с помощью встроенного трансформатора тока, а при работе с нагрузочным трансформатором может использоваться внешний измерительный трансформатор.

Контроллер выполнен на базе микропроцессора К1821ВМ85 и БИС серии КР580. Силовые тиристоры выбраны на ток 1200 А, установлены на радиаторах и снабжены узлом тепловой защиты.

1.3.6. Компьютерные испытательные установки.

Научно-производственное объединение «Динамика» (г. Чебоксары) разработало и выпускает компьютерные испытательные системы РЕЛЕ-ТОМОГРАФ-41М для автоматизированной проверки сложных устройств РЗА и

портативные электромеханические приборы РЕТОМ-11 для проверки простых защит (взамен У5053 и т. п.), взаимно дополняющие друг друга.

Испытательная система РЕЛЕ-ТОМОГРАФ-41М работает совместно с управляющим устройством на базе компьютера IBM Pentium и включает в себя испытательный прибор РЕТОМ-41М и стандартное программное обеспечение, которое состоит из следующих модулей:

- ручное управление источниками тока и напряжения;
- проверка реле тока и напряжения в ручном и автоматическом режимах;
- проверка дистанционной защиты;
- воспроизведение аварийных процессов;
- цифровой мультиметр и др.

Кроме стандартного программного обеспечения, создано несколько десятков специализированных проверочных программ для наиболее сложных и широко используемых реле и комплектов защиты

Масса РЕТОМ-41М не более 18 кг, цена — порядка 10 000 долл.

По желанию заказчика в комплект поставки могут быть включены блоки однофазных нагрузочных трансформаторов тока РЕТ-10 и трехфазных преобразователей напряжения РЕТ-ТН, управляющее устройство на базе портативного компьютера NOTEBOOK и др. Блок РЕТ-10 позволяет с высокой точностью масштабировать один из выходных токовых каналов с коэффициентами 10 и 0,1, а блок РЕТ-ТН масштабировать трехфазную систему напряжений на выходе прибора РЕТОМ-41М с коэффициентами трансформации 1, $\sqrt{3}$ и 5. Масса каждого блока — 9 кг.

Устройство содержит 3 источника тока, выдающих в трехфазном режиме ток до 20 А, в однофазном — до 60 А (с трансформаторными блоками РЕТ-10 соответственно до 200 и 600 А), в режиме постоянного тока — до 20 А. Три источника напряжения позволяют получить в трехфазном режиме напряжение до 120 В, в однофазном — до 240, а в режиме постоянного тока — до 320 В. Общий диапазон частот выдаваемых сигналов тока и напряжения 0—500 Гц, фазы — 0—360°.

Пользователь задает необходимые режимы работы на персональном компьютере, который моделирует их, вырабатывает цифровые выборки токов и напряжений и передает их в РЕТОМ-41М. Силовые ЦАП масштабируют эти выборки и формируют аналоговые сигналы токов и напряжений всех трех фаз и тока нулевого провода. Сигналы реакции проверяемой защиты поступают в компьютер, который обрабатывает эту информацию и выдает протокол испытаний на дисплей или принтер. Все операции по подключению проверяемой защиты к устройству РЕТОМ осуществляются на его лицевой панели (рис. 16).

РЕТОМ-41М — современный универсальный прецизионный прибор, который не только не уступает лучшим зарубежным аналогам, но по ряду показателей и превосходит их.

РЕТОМ-11 — это портативный электромеханический испытательный прибор для проверки простых защит (рис. 17). В комплект поставки входят: собственно прибор; блок балластных сопротивлений (на рис. 17 справа), который включается в цепь первичной обмотки выходного трансформатора блока и позволяет повысить точность измерений при проверке низкоомных реле; вы-

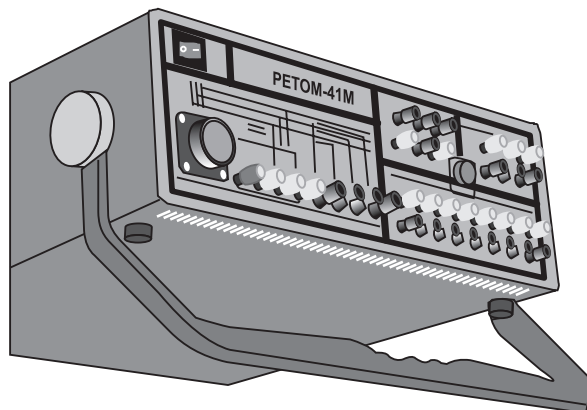


Рис. 16. Внешний вид испытательного прибора РЕТОМ-41М

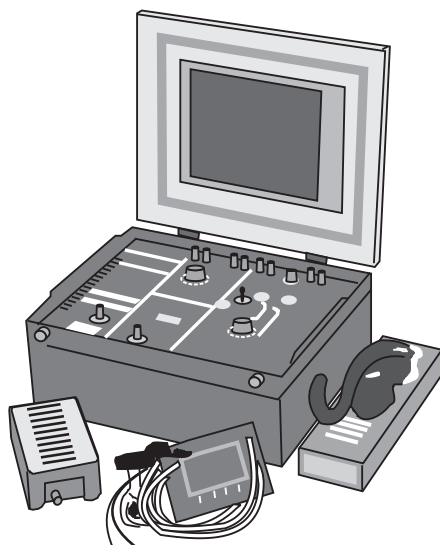


Рис. 17. Внешний вид прибора РЕТОМ-11

прямительный блок (слева) для получения выпрямленного тока до 10 А и фильтр длительности, предназначенный для устранения влияния «дребезга» контактов. Дополнительно может быть поставлен блок РЕТ-ВАХ для снятия вольт-амперных характеристик.

Напряжение постоянного тока регулируется в пределах 0—300 В, переменного 0—250 В, переменный ток 0—200 А. Встроенные цифровой мультиметр и секундомер позволяют измерять напряжение до 500 В, ток до 200 А и время от 0,001 до 100 с. Блок РЕТ-ВАХ используется как приставка к прибору РЕТОМ-11 и позволяет расширить диапазон выдаваемого напряжения до 1000 В. Масса прибора — не более 25 кг, цена около 3000 долл.

2. Электрические измерения

2.1. Метрология. Погрешности

2.1.1. Основные понятия и определения. Все измерения физических величин выполняют с помощью *средств измерений*. Измерения физических величин с помощью электрических приборов (т. е. средств, в которых измерительная информация передается с помощью электрического сигнала), называют *электрическими измерениями*. При *прямом* измерении искомое значение величины находят непосредственно из опыта; пример — измерение напряжения источника вольтметром. При *косвенном* измерении искомое значение находят расчетным путем на основании известной зависимости между данной величиной и величинами, определяемыми путем прямых измерений; пример — расчет сопротивления резистора на основании закона Ома по измеренным значениям тока через резистор и падения напряжения на нем.

Результат измерения всегда отличается от истинного значения измеряемой величины. *Абсолютная погрешность* ΔA равна разности между измеренным $A_{из}$ и действительным A_d значениями измеряемой величины A :

$$\Delta A = A_{из} - A_d.$$

Под действительным значением измеряемой величины понимают то значение ее, которое найдено экспериментальным путем с помощью образцовых приборов и для данной цели может быть принято за истинное.

Относительной погрешностью измерения называют отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению величины:

$$\delta_a = \Delta A / A_d.$$

Приведенной относительной погрешностью называется отношение абсолютной погрешности к разности между верхним и нижним пределами измерения прибора, а если нижний предел равен нулю, то — к верхнему пределу измерения в данном диапазоне (для двусторонней шкалы — к сумме верхних пределов):

$$\delta_{пр} = \Delta A / a_v.$$

Предельное значение приведенной относительной погрешности, выраженное в процентах, указывает *класс точности* приборов, погрешность которых не зависит от значения измеряемой величины. К таким приборам относится большинство стрелочных показывающих и самопишущих приборов. Для при-

боров, погрешность которых зависит от значения измеряемой величины (цифровые приборы, мосты, компенсаторы), предельное значение основной относительной погрешности определяется формулой

$$\delta_m = c + d (x_k/x - 1),$$

а класс прибора — отношением c/d ; здесь c и d — постоянные числа, x_k — конечное значение диапазона измерений, x — значение измеренной величины, например, $\delta_m = 0,05 + 0,02(U_k/U - 1)$, класс точности 0,05/0,02 (вольтметр), или $\delta_m = 0,2 + 0,1(I_k/I - 1)$, класс точности 0,2/0,1 (амперметр). Стандартизированы классы 0,05...4,0, но выпускаются и приборы с более высокой погрешностью (10—15 %).

Если искомая величина A равна сумме или разности двух или нескольких величин, например B и C , то наибольшая возможная относительная погрешность

$$\delta_a = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B \pm C},$$

где ΔB и ΔC — наибольшие возможные погрешности измерения величин B и C , а знак «+» или «-» выбирается в зависимости от того, складываются или вычитаются эти величины в формуле $A = f(B, C)$.

Если искомая величина определяется как произведение нескольких измеренных величин, например

$$A = B^m C^n D^p,$$

где показатели степени m , n , p — целые, дробные, положительные или отрицательные числа, то наибольшая возможная относительная погрешность находится по формуле

$$\delta A = m\delta_B + n\delta_C + p\delta_D,$$

где δ_B , δ_C , δ_D — относительные погрешности непосредственно измеренных величин.

Когда погрешности непосредственных измерений имеют разные знаки, то для учета самого неблагоприятного случая их суммируют с одинаковыми знаками.

Различают систематические и случайные погрешности измерения. *Систематическая* погрешность остается неизменной или изменяется закономерно, а *случайная* — изменяется случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины. Постоянная систематическая погрешность может возникать, например, при пользовании СИ, параметры которых отличны от номинальных, переменная — от закономерного изменения напряжения источника питания, в частности, разряда аккумулятора. Случайные погрешности вызываются причинами, которые неизвестны оператору и не учитываются им, или эти причины сами имеют случайный характер (например, наводки от электромагнитных полей). Уменьшение случайных погрешностей достигается

либо устранением причин погрешностей или уменьшением их влияния (например, экранировкой цепей), либо повторными измерениями.

2.1.2. Типичные составляющие погрешности измерений.

2.1.2.1. Методические составляющие погрешности измерений (погрешности метода) и их причины.

а) несоответствие модели, параметры которой измеряются, контролируемому объекту. Пример: измеряется амплитудное значение U_m напряжения источника переменного тока, которое предполагается синусоидальным (модель). Если измерение производится вольтметром, реагирующим на действующее значение напряжения, а амплитудное вычисляется как $U_m = \sqrt{2}U_v$, где U_v — показание вольтметра, то возникающая ошибка будет обусловлена степенью отклонения формы напряжения от синусоидальной. Несоответствие принятой модели (синусоиды) и реальной кривой приводит к систематической погрешности измерения напряжения данным методом:

$$\Delta U = \sqrt{2}U_v - kU_v, \quad \text{где } k \neq \sqrt{2};$$

б) отклонения от принятых значений контролируемого параметра. Пример: измеряется ток линии посредством трансформатора тока. Погрешность измерения зависит от первичного тока ТА: с увеличением его до 100—120 % номинального погрешности трансформации близки к номинальным значениям, а при очень большой кратности тока, превышающей предельно допустимую для релейной защиты, токовая и угловая погрешности ТА могут превзойти соответственно 10 % и 7°;

в) отклонение от принятых значений разницы между значениями измеряемой величины на входе прибора и в точке отбора. Пример: измеряется сопротивление по схеме амперметра—вольтметра. Погрешность обусловлена местом включения приборов и зависит от падения напряжения на амперметре или ответвления тока в цепь вольтметра;

г) погрешность из-за эффектов квантования. Если определяется среднее значение величины по результатам нескольких измерений, то полезно помнить, что уменьшение погрешности может быть достигнуто не только повышением точности измерительных приборов, но и увеличением числа n измерений, причем погрешность уменьшится в \sqrt{n} раз. Пример: измеряется среднесуточное потребление мощности. Погрешность зависит от числа включений ваттметра в продолжение суток и при увеличении этого числа, например, вдвое снижается на 30 %;

г) отличие алгоритма вычислений от функции, строго связывающей результаты непосредственных измерений с искомой величиной. Пример: при расчете активного сопротивления в зависимости от температуры (или, наоборот, температуры по изменению сопротивления) на практике пользуются формулой

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1)],$$

где R_1 — сопротивление, измеренное при температуре T_1 ; R_2 — сопротивление при температуре T_2 ; α — температурный коэффициент.

Для прецизионных измерений применяют более строгую трехчленную формулу академика Б. С. Якоби:

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(T_2 - T_1) + \beta(T_2 - T_1)^2],$$

где β — второй температурный коэффициент.

2.1.2.2. Инструментальные погрешности.

а) погрешности, вызываемые внешними медленно меняющимися величинами. Примеры: изменение климатических параметров, напряженности электрических и магнитных полей, непостоянство напряжения источников питания;

б) погрешности, вызываемые ограниченной разрешающей способностью измерительных приборов. Пример: измерение параметра, значение которого соизмеримо с ценой деления шкалы прибора;

в) динамические погрешности, вызываемые инерционностью. Зависят как от свойств прибора, так и от характера изменения во времени измеряемой величины. Пример: измерение параметров быстропеременных процессов посредством самописца;

г) погрешности, вызываемые взаимодействием с объектом измерения и другими приборами. Пример: измерение ЭДС источника малой мощности вольтметром с невысоким внутренним сопротивлением;

д) погрешности передачи измерительной информации. Примеры: падение напряжения в соединительных проводах; «размытое» изображение на экране осциллографа.

2.1.2.3. Погрешности, вносимые оператором (субъективные погрешности).

а) погрешности считывания значения измеряемой величины со шкал и диаграмм;

б) погрешности обработки диаграмм без применения технических средств. Пример: обработка виброграммы при снятии скоростных характеристик высоковольтных выключателей;

в) погрешности, вызываемые воздействием оператора на объект и приборы. Пример: влияние оператора и расположения проводов при измерении малых емкостей, параметров полевых транзисторов, микросхем и пр.

Кроме того, свою долю погрешности могут внести средства вычислительной техники (калькуляторы, компьютеры и др.), применяемые при обработке промежуточных результатов измерений (погрешность вычислений).

2.1.2.4. Основная и дополнительная погрешности. Погрешности измерений зависят от внешних условий (влияющих факторов), поэтому их принято делить на основные и дополнительные. *Основной погрешностью* (δ_0) СИ называют погрешность в условиях, принятых за нормальные. *Дополнительные погрешности* (δ_d) СИ возникают при отклонении влияющих факторов от нормальных значений. В число влияющих факторов входят:

а) изменение температуры. Отклонение температуры T , при которой производится измерение, от того значения T_0 , при котором градуировался прибор (от 15 до 25 °С), вызывает погрешность (δ_t), равную основной, на каждые 10 °С разности $T - T_0$;

б) отклонение напряжения от номинального. Вызванную этим погрешность (δ_n) следует учитывать при настройке частотных реле, можно пренебречь ею при снятии векторных диаграмм, в других случаях — исключить выбором соответствующей схемы испытаний;

в) влияние внешних магнитных полей. Погрешность (δ_Φ) зависит от конструкции и степени защиты прибора и определяется стандартом в функции напряженности магнитного поля. Значение напряженности H , создаваемой прямолинейным проводником с током I на расстоянии l от его оси, можно рассчитать по уравнению

$$H = I/2\pi l.$$

Если данные приводятся во внесистемных единицах, то следует помнить, что $1 \text{ Э} = 79,6 \text{ А/м}$;

г) отклонение положения прибора от нормального. При отклонении положения прибора на 10° погрешность (δ_L) численно равна классу прибора;

д) погрешность измерительных трансформаторов (δ_t).

2.1.2.5. Общая погрешность. Суммарная дополнительная погрешность рассчитывается как

$$\delta_d = \sqrt{\delta_t^2 + \delta_n^2 + \delta_\Phi^2 + \delta_L^2 + \delta_t^2},$$

а общая погрешность будет

$$\delta = \sqrt{\delta_0^2 + \delta_d^2}.$$

Пример. Определить возможную погрешность измерения сопротивления срабатывания реле методом амперметра—вольтметра при следующих условиях: температура окружающей среды $+5^\circ\text{C}$. Настройка производится при токе 50 А и напряжении 50 В. Для измерений используются вольтметр с пределами 150/300 В, класс точности 0,5 и амперметр на 5/10 А, класс 0,5, включенный через трансформатор тока с коэффициентом трансформации 100/5, класс 0,2.

При выбранных пределах измерений амперметр с пределом 5 А будет работать на середине, а вольтметр, включенный на 150 В, на 1/3 шкалы, и соответственно основная погрешность амперметра составит 1 %, а вольтметра — 1,5 %. Если приборы градуировались при 15°C , то погрешность от изменения температуры, отнесенная к измеренному значению, будет у вольтметра 1,5 %, а у амперметра — пренебрежимо мала. Погрешность от влияния внешних магнитных полей можно считать пропорциональной напряженности H . Приняв, что токоведущий провод расположен на расстоянии 10 см от измерительного прибора, получим

$$H = \frac{50}{2 \times 3,14 \times 0,1} = 79,6 \text{ А/м} = 1 \text{ Э}.$$

Пусть приведенная погрешность приборов в поле 5 Э составляет 2,5 %, тогда погрешность для амперметра будет $2,5 \cdot 2/5 = 1 \%$, а для вольтметра $2,5 \cdot 3/5 = 1,5 \%$.

Погрешности от изменения напряжения вольтметры и амперметры не имеют. Погрешность от наклона приборов на 10° от горизонтального положения будет равна $0,5 \cdot 2 = 1 \%$ для амперметра и $0,5 \cdot 3 = 1,5 \%$ для вольтметра. Погрешность трансформатора тока, работающего в середине шкалы, будет 0,4 %.

Возможная суммарная дополнительная погрешность составит:
для амперметра

$$\delta_{\text{да}} = \sqrt{1^2 + 1^2 + 0,4^2} = 1,5 \%,$$

для вольтметра

$$\delta_{\text{дв}} = \sqrt{1,5^2 + 1,5^2 + 1,5^2} = 2,6 \%,$$

а возможная полная погрешность:

для амперметра

$$\delta_{\text{а}} = \sqrt{1^2 + 1,5^2} = 1,8 \%,$$

для вольтметра

$$\delta_{\text{в}} = \sqrt{1,5^2 + 2,6^2} = 3,0 \%.$$

Возможную погрешность определения сопротивления как частного от деления напряжения на ток найдем как сумму $\delta_{\text{R}} = \delta_{\text{а}} + \delta_{\text{в}} = 1,8 + 3,0 = 4,8 \%$. Сравнительно большое значение погрешности обусловлено тем, что пределы измерений у приборов выбраны не оптимальным образом. В самом деле, если применить трансформатор тока с коэффициентом трансформации 50/5 и вольтметр с пределом измерения 50 В, то и амперметр, и вольтметр будут работать в конце шкалы, их погрешности уменьшатся соответственно в 2 и 3 раза и погрешности будут $\delta_{\text{а}} = 0,9 \%$, $\delta_{\text{в}} = 1 \%$ и $\delta_{\text{R}} = 1,9 \%$ действительного значения величин.

2.2. Электроизмерительные приборы

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывной функцией измеряемой величины, называются *аналоговыми*. Эти приборы имеют оцифрованную шкалу, а перемещение их подвижной части (обычно — угловое) со стрелкой определяется значением измеряемой величины. *Цифровые* приборы автоматически вырабатывают дискретные сигналы измерительной информации, а показания их представляются в цифровой форме на табло. Соответственно цифровой прибор всегда содержит два основных функциональных узла: АЦП и цифровое отсчетное устройство. Система приборов (отечественного изготовления) обозначается буквами русского алфавита: циф-

ровая — буквой Щ, аналоговые — в зависимости от конструкции измерительного механизма (далее — в скобках).

В приборах магнитоэлектрической системы (**М**) подвижная часть механизма отклоняется в результате взаимодействия магнитных полей постоянного магнита и проводников с током, выполненных в виде закрепленной на оси катушки. Угол поворота стрелки прямо пропорционален току в катушке (измеряемой величине), а направление поворота (знак угла) зависит от направления тока. Шкала прибора — равномерная, что способствует повышению точности градуировки и отсчета. Особо чувствительные магнитоэлектрические приборы называются *гальванометрами*.

Основные достоинства приборов магнитоэлектрической системы — высокая точность, большая чувствительность, малое собственное потребление; недостаток — возможность измерений лишь в цепях постоянного тока. Впрочем, этот недостаток легко преодолевается применением выпрямителей.

Электромагнитные приборы (**Э**) содержат неподвижную катушку и ферромагнитный сердечник, который втягивается внутрь катушки, когда по ней проходит измеряемый ток. Угол отклонения стрелки пропорционален квадрату тока в катушке, поэтому направление поворота не зависит от направления (знака) тока. В цепи переменного тока прибор измеряет действующее (эффективное) значение тока. Шкала прибора в начале сжата, а в конце растянута.

Достоинства электромагнитных приборов — простота, надежность, пригодность для измерений в цепях постоянного и переменного тока. Недостатки — большое собственное потребление, невысокая точность, малая чувствительность, неравномерность шкалы. Рекомендуется применять для измерений переменного тока и напряжения.

Электродинамические приборы (**Д**) используют взаимодействие двух катушек с током, одна из которых может поворачиваться на оси. Угол поворота подвижной части пропорционален квадрату тока. Достоинства приборов этого типа — высокая точность, пригодность для постоянного и переменного тока; недостатки — большое потребление, неравномерность шкалы.

Для работы в самопишущих приборах, а также в условиях тряски, вибрации находят применение ферродинамические измерительные механизмы, у которых неподвижная катушка расположена на сердечнике из ферромагнитного материала. Этим достигается увеличение вращающего момента и уменьшение влияния внешних магнитных полей, повышение чувствительности и уменьшение потребления. Вместе с тем наличие нелинейного элемента (магнитопровода) снижает точность приборов.

Индукционный измерительный механизм (**И**) содержит неподвижные электромагниты и подвижную часть в виде алюминиевого диска. Такие системы применяются в счетчиках энергии переменного тока. Обмотка одного из электромагнитов включается в цепь последовательно с нагрузкой, обмотка другого — параллельно нагрузке. Взаимодействие магнитных потоков Φ_1 и Φ_U этих электромагнитов создает на диске вращающий момент

$$M = k\Phi_1\Phi_U \sin \psi,$$

где k — коэффициент, ψ — фазный угол между векторами потоков.

Путем надлежащего выбора конструктивных и схемных элементов можно добиться равенства $\psi = 90^\circ - \varphi$ или $\psi = \varphi$; в первом случае момент будет пропорционален активной мощности $P = UI \cos \varphi$, во втором — реактивной $Q = UI \sin \varphi$. При равномерном вращении диска данное устройство приобретает свойства интегрирующего элемента и будет отсчитывать соответственно активную или реактивную электрическую энергию.

Индукционные механизмы имеют большой вращающий момент, устойчивы к перегрузкам и влиянию внешних магнитных полей; недостатки — инерционность, невысокая точность.

На основе рассмотренных систем строятся и *логометры* — приборы, реагирующие на отношение двух электрических величин. Подвижная часть логометра состоит из двух катушек, жестко укрепленных на одной оси и находящихся в магнитном поле неподвижных катушек. Отклонение подвижной части определяется отношением токов в катушках и потому не зависит от напряжения источника питания, к которому они обе подключены. На постоянном токе измерительные механизмы в виде логометров применяются в омметрах, на переменном — в фазометрах, частотомерах, фарадметрах.

Электростатические приборы (С). Вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных металлических пластин, одна из которых подвижная, другая — неподвижная. Отклонение подвижной части вызывает изменение емкости вследствие изменения активной площади пластин или расстояния между ними. Первый тип механизмов используется главным образом в вольтметрах на сравнительно небольшие напряжения (десятки и сотни вольт), второй — в киловольтметрах. Когда к подвижным и неподвижным пластинам подводится измеряемое напряжение, они заряжаются с противоположным знаком и притягиваются друг к другу. Перемещение подвижных пластин передается на указатель, и по положению его на шкале определяют значение измеряемого напряжения.

Шкала прибора — практически равномерная на участке от 15—25 до 100 % диапазона. Электростатические приборы используются для измерения напряжения постоянного и переменного тока частотой до нескольких десятков МГц. Собственное потребление на переменном токе весьма мало, а на постоянном токе близко к нулю. На показания приборов почти не влияют частота измеряемого напряжения, температура окружающего воздуха и посторонние магнитные поля, но в сильной степени сказывается влияние электрических полей и влажности воздуха. Для уменьшения влияния внешних электрических полей применяется экранирование прибора: экран соединяется с одним из его зажимов, который при измерении заземляется.

Термоэлектрический (Т) прибор представляет собой совокупность одного или нескольких термопреобразователей с магнитоэлектрическим измерительным механизмом. Преобразователь состоит из термопары и нагревателя в виде тонкой проволоки, через которую пропускается измеряемый ток. Термо-ЭДС преобразователя пропорциональна количеству теплоты, выделенному в нагревателе, т. е. квадрату действующего значения измеряемого тока. Поскольку количество выделяемой теплоты не зависит от частоты тока, термоэлектрическими приборами можно пользоваться и на постоянном, и на пере-

менном токе, включая радиочастоты до 100 МГц. К недостаткам приборов относятся малая перегрузочная способность, ограниченный срок службы и значительное собственное потребление.

Приборам, содержащим электронные компоненты, присвоен символ Φ . Электронные вольтметры представляют собой сочетание выпрямителя, усилителя постоянного тока и магнитоэлектрического измерительного механизма.

Различают вольтметры среднего U_{cp} , действующего (эффективного) U и амплитудного (максимального) U_m значения. Связь между ними устанавливается посредством коэффициентов амплитуды k_a и формы k_Φ :

$$k_a = U_m/U; \quad k_\Phi = U/U_{cp}.$$

При синусоидальной форме кривой $k_a = \sqrt{2} = 1,41$; $k_\Phi = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$.

Электронные вольтметры среднего значения напряжения содержат одно- или двухполупериодные выпрямители, диоды которых работают на линейной части их вольт-амперной характеристики. В вольтметрах действующего значения используются вентили с квадратичной вольт-амперной характеристикой вида $i = au^2$. Выпускаются и электронные вольтметры действующего значения с электростатическим измерительным механизмом, который исключает необходимость в использовании выпрямителей.

Вольтметрами амплитудного значения (амплитудными вольтметрами) называют приборы, показания которых соответствуют амплитуде измеряемого напряжения при синусоидальной форме или максимальному его значению при отклонении формы кривой напряжения от синусоиды. Для измерения амплитуды в схему вольтметра вводится элемент «памяти», в качестве которого может служить конденсатор. Применяются две основные схемы амплитудных выпрямителей (амплитудных детекторов): с открытым и закрытым входом. В схеме с открытым входом конденсатор заряжается через диод до амплитудного значения измеряемого напряжения U_m , а если оно содержит постоянную составляющую U_0 — то до суммарного значения $U_m + U_0$. Для измерения амплитуды служат схемы с закрытым входом, который содержит конденсатор, не пропускающий постоянную составляющую.

Главные достоинства электронных вольтметров: высокая чувствительность; малое собственное потребление; широкий диапазон рабочих частот (до 10—100 МГц) и измеряемых напряжений. Основным недостатком их является ограниченная точность.

Электронные счетчики содержат преобразователи мощности в частоту и счетчик импульсов, выполняющий функции интегратора. Сигнал, пропорциональный мощности, получается с помощью блоков широтно-импульсной и амплитудно-импульсной модуляции: первый преобразует ток в последовательность импульсов переменной длительности, второй — изменяет амплитуду их в зависимости от напряжения на нагрузке, чем достигается перемножение тока и напряжения.

Широкое распространение получили электронные мегаомметры ($\Phi 4102$, $\Phi 4108$ и др.), комбинированные приборы ($\Phi 4318$ и др.) и иные.

Комбинированные приборы (Ц) — ампервольтметры (авометры, или мультиметры, тестеры) — универсальные многопредельные измерители, содержащие магнитоэлектрический прибор с добавочными резисторами и шунтами. При измерении переменных токов и напряжений используются полупроводниковые вентили. Угол поворота стрелки соответствует среднему значению измеряемой величины, но градуируются вентильные приборы по расчетному действующему значению синусоидального тока (коэффициент формы 1,11). Поэтому при отклонении формы кривой переменного тока от синусоиды такие приборы дают большую погрешность.

К настоящему времени самое широкое распространение получили цифровые мультиметры. Малогабаритные, легкие, с малым потреблением и широким спектром измеряемых величин, включая h — параметры транзисторов и даже температуру, они помогают избавить наладчика от необходимости переноса и хранения нескольких аналоговых приборов узкого назначения. Относительным недостатком, по сравнению с аналоговыми приборами, можно считать необходимость наличия источника питания (батарей) даже при измерении активных электрических параметров (тока, напряжения) и недостаточную наглядность при оценке изменяющихся величин.

В качестве примера на рис. 18 показан мультиметр серии M890F. Выбор измеряемого параметра и пределов его измерения производится поворотным переключателем (в центре) на 32 позиции, индикация — на жидких кристаллах. Мультиметрами M890 измеряются напряжение постоянного (до 1000 В) и переменного (до 700 В) тока, постоянный и переменный ток (до 20 А), сопротивление (с пределами от 200 Ом до 200 МОм), емкость (с пределами от 0,002 до 20 мкФ), h — параметры, температура, частота. Следует еще отметить, что с целью экономии расхода энергии прибор снабжен устройством, автоматически отключающим источник питания через определенный промежуток времени после измерения («Auto off power»).



Рис. 18. Мультиметр M890F. Лицевая панель

Портативные цифровые приборы корпорации FLUKE могут не только измерять электрические параметры, но и выполнять функции осциллографа и др. Выпускаются также специальные мультиметры для высокоточных измерений.

В процессе массовых проверок электрических цепей и оборудования часто требуется не измерить точное значение того или иного параметра, а лишь установить, отличается ли его значение от нуля. Такие приборы получили общее название *индикаторов*. Самым употребительным из них является устройство с обиходным названием «пробник», служащее для проверки наличия электрической цепи, целостности проводников, и состоящее, в простейшем варианте, из батарейки и светового индикатора — лампочки карманного фонаря или светодиода. Первоначально в качестве индикатора применяли электрический звонок, а потому и сама операция получила бытующее до сих пор название «прозвонка».

Несмотря на крайнюю простоту, пробник с электрической лампочкой удобен тем, что позволяет надежно установить наличие короткозамкнутой электрической цепи, так как уже при сопротивлении 20—30 Ом лампочка не горит. Кроме того, по искрению при размыкании цепи можно судить о наличии в ней индуктивности. В одной из удачных конструкций такого пробника (Тайвань) один конец пластмассового корпуса цилиндрической формы снабжен металлическим щупом, а с другого конца, выполненного из прозрачного материала, выведен гибкий проводник с зажимом «крокодил». При переноске острый щуп закрывается наконечником, что предотвращает разряд батареи при случайном соприкосновении щупа и «крокодила», да и повреждение одежды оператора тоже. В ярко освещенных помещениях предпочитают вместо световых индикаторов использовать звуковые, например, миниатюрные динамики.

«Слабым местом» простейшего пробника является то, что при попадании на его выводы напряжения внешней цепи он выходит из строя. В ряде конструкций этот недостаток так или иначе преодолевается. Например, схема пробника ПУ-82М (разработка ЛенПЭО ГПИ «Тяжпромэлектропроект») построена так, что благодаря высокоомному входу выдерживает приложение напряжения в течение 30 с. При наличии напряжения загорается красный светодиод, при короткозамкнутой цепи — зеленый. С помощью этого прибора можно определить и диапазон сопротивления контролируемой цепи: при значениях от 0 до 10 Ом индикация непрерывная, от 10 до 8000 — прерывистая, более 8000 Ом и при обрыве цепи — сигнал отсутствует. Жесткий щуп прибора — выдвигной, с пружинным фиксатором.

Индикаторные приборы последних лет способны выполнять целый ряд различных функций. Простой и дешевый (около 2 долл.) многофункциональный прибор ИМ-1 выпускает Арзамасский завод радиодеталей (рис. 19). Светодиодная индикация позволяет определить наличие напряжения от 4 до 380 В с указанием фазного и нулевого провода переменного и полярности постоянного напряжения, исправность конденсаторов, диодов и транзисторов. Надо, однако, иметь в виду, что из-за малого потребления светодиоды в схеме гаснут только при сопротивлении больше 0,5 МОм, что существенно ограничивает возможности применения прибора для прозвон-



Рис. 19. Многофункциональный индикатор ИМ-1

ки. Несколько более сложный пробник ИМ-2 позволяет приблизительно определить порядок значения напряжения, обеспечивает световую и звуковую индикацию.

Традиционно выпускаются и однофункциональные индикаторы напряжения. Индикатор-отвертка ИН-91 предназначен для проверки наличия переменного напряжения от 110 до 380 В. У индикатора ПИН-90 верхний порог напряжения постоянного и переменного тока повышен до 750 В. Индикатор состоит из двух диэлектрических рукояток с металлическими наконечниками, в одну из которых вмонтирована неоновая лампа, в другую — ограничительный резистор. Индикатор переменного напряжения УН-1 дает возможность судить не только о наличии напряжения, но и о его соответствии значениям 127, 220 и 380 В, — по длине светящегося столба линейного аналогового индикатора.

Выпускаются также высоковольтные указатели напряжения переменного тока со светоиндикатором в виде газоразрядной (неоновой) лампы. Так, указатели УВН-80М и УН-450 предназначены для напряжения до 10 кВ, УВН-90 — до 110 кВ.

2.3. Техника измерений

2.3.1. Измерение постоянного тока и напряжения. Эти параметры измеряют, как правило, приборами магнитоэлектрической системы, но применяют и приборы других типов, а также мультиметры. Для измерения в цепях малой мощности используют электронные и цифровые приборы, часто в качестве милливольтметров. Весьма малые напряжения можно измерить гальванометром.

Для расширения пределов измерения вольтметров последовательно с обмоткой прибора включают добавочные резисторы. При этом измеренное напряжение будет

$$U = pU_v,$$

где $p = (R_d/R_v) + 1$; U_v — показание вольтметра; R_v — входное сопротивление вольтметра; R_d — сопротивление добавочного резистора.

Добавочные резисторы бывают встроенные или наружные, последние — для измерения напряжения свыше 500 В. Кроме основного назначения, эти резисторы способствуют также уменьшению температурной погрешности, так как изготавливаются из материала с очень малым температурным коэффициентом сопротивления.

Расширение пределов измерения достигается также посредством делителей напряжения (потенциометров) с фиксированным коэффициентом деления, обычно кратным 10. Сопротивление делителя при этом должно быть значительно больше выходного сопротивления объекта измерения, но меньше внутреннего сопротивления прибора; оба эти требования не всегда удается совместить.

Малые токи (от нескольких микроампер до 20—50 мА) измеряют микро- и миллиамперметрами; включая их в разрыв цепи тока непосредственно. Для измерения больших токов применяют шунты — внутренние, встроенные в прибор (на токи до 50—100 А), и наружные (до нескольких тысяч ампер). Шунт — проводник из термостабильного сплава с очень малым сопротивлением, калиброванным с высокой точностью (класс точности 0,05—0,5). Наружные шунты имеют токовые зажимы для включения в цепь измеряемого тока и расположенные между ними (чтобы исключить падение напряжения в контактах) потенциальные зажимы для подключения к измерительному прибору — милливольтметру, градуированному в единицах силы тока. Как правило, падение напряжения на шунте при номинальном токе через него составляет 75 мВ (редко — 45 мВ). Измеренный ток будет

$$I = I_n U / U_n,$$

где I_n и U_n — номинальные значения тока шунта и падения напряжения на нем; U — падение напряжения на шунте от тока I .

В установках высокого напряжения и в сильноточных цепях могут использоваться трансформаторы постоянного тока.

2.3.2. Измерение переменного тока и напряжения. Может производиться непосредственно приборами любого типа, кроме магнитоэлектрических. При больших значениях этих параметров используются измерительные трансформаторы тока и напряжения.

У трансформаторов тока (ТА) первичная обмотка включается последовательно в цепь измеряемого тока, а вторичная питает токовые цепи приборов и защиты. Вторичная обмотка выполняется на номинальный ток 5 и 1 А; последнее значение чаще встречается у электронных защит с малым собственным потреблением, в длинных цепях РЗА и пр. Работают эти трансформаторы в режиме, близком к короткому замыканию. Наибольшее сопротивление на-

грузки, которое можно включить в цепь вторичной обмотки без увеличения погрешности ТА сверх номинальной, соответствующей классу точности, указывается в паспорте трансформатора.

На рис. 20 показан малогабаритный (масса 1,5 кг) лабораторный трансформатор тока типа УТТ5М на 7 пределов измерения, с номинальным вторичным током 5 А. Его первичная обмотка имеет отводы на 15 и 50 А. Пропустив один виток первичной обмотки сквозь окно сердечника, можно повысить верхний предел измерения до 600 А, два витка — до 300 А и т. д. Зажимы вторичной обмотки И1 — И2 соединяются накоротко перемычкой, которую снимают только на время испытаний при полностью собранной вторичной цепи ТА.

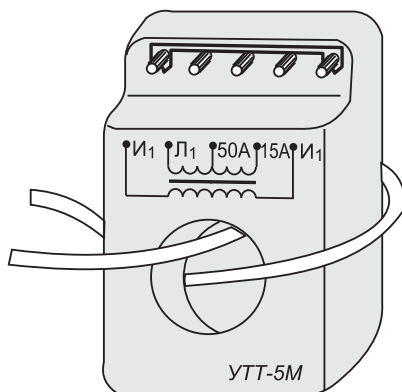


Рис. 20. Трансформатор тока типа УТТ5М

Трансформатор тока УТТ-6М2 имеет верхний предел 2000 А.

Иногда сердечник выполняют разъемным с тем, чтобы его можно было надеть на токоведущий провод и производить измерения без разрыва цепи измеряемого тока. Это так называемые токоизмерительные клещи, которыми, кроме тока, можно измерять также и некоторые другие параметры. Клещи токоизмерительные Ц91 измеряют ток до 500 А и напряжение до 600 В; клещи Ц4501 (взамен Ц91) — ток до 500 А, напряжение до 600 В и сопротивление до 2 кОм; клещи ЭЛ9000 могут измерять мощность до 75 кВт. Клещи Ц4502 (взамен Ц90) — высоковольтные, предназначены для работы в цепях до 10 кВ.

Для измерения напряжения переменного тока часто применяют электромагнитные приборы, для более точных измерений — электродинамические. Малые напряжения измеряют электронными и цифровыми приборами, осциллографами, высокие напряжения — электростатическими приборами, а также с помощью делителей (резистивных или емкостных) или трансформаторов напряжения. Емкостные добавки применяются редко, так как при наличии высших гармонических нарушается прямая пропорциональность между напряжением U и током $I = \omega CU$.

2.3.3. Измерение мощности. Мощность можно измерить непосредственно или косвенным способом. Для непосредственного измерения в цепях постоянного и переменного тока широко применяются ваттметры на основе приборов электродинамической и ферродинамической систем: одна из

катушек прибора включается последовательно в цепь тока нагрузки, другая — через добавочный резистор параллельно нагрузке (рис. 21а). Электродинамические ваттметры выпускают в виде переносных приборов высокого класса точности (0,1—0,5) для измерений на частоте до 5 кГц. Ферродинамические ваттметры применяют главным образом на промышленной частоте, т. к. на постоянном токе они имеют значительную погрешность из-за гистерезиса сердечников, а на высокой частоте — большие потери. Для измерения мощности на высоких частотах используют термоэлектрические и электронные приборы.

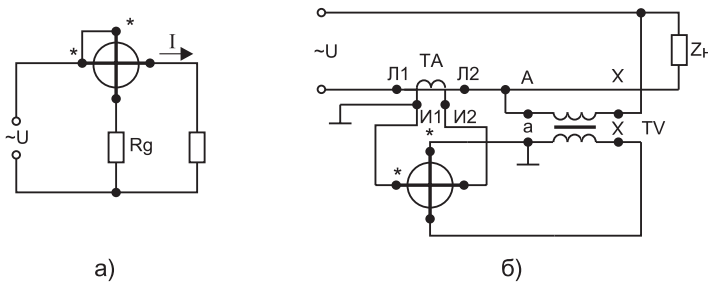


Рис. 21. Схемы измерения мощности ваттметрами: а — непосредственное включение прибора; б — включение через измерительные трансформаторы; R_d — добавочный резистор; Z_H — нагрузка

Направление отклонения подвижной части ваттметра зависит от направления токов в его цепях: изменение направления тока в одной из его катушек вызывает отклонение стрелки в противоположную сторону. Прибор будет работать правильно, если зажимы, помеченные «звездочкой» и называемые генераторными, или сетевыми, будут подключены к одному и тому же полюсу (фазе) источника питания.

При нагрузке больше 10—20 А токовую катушку включают через трансформатор тока; независимо от нагрузки, в цепях высокого напряжения применяют трансформаторы тока и напряжения (рис. 21б). Здесь также надо учитывать полярность зажимов в цепях тока и напряжения: токи в обмотках ваттметра должны сохранить то же направление, что и без измерительных трансформаторов. С этой целью генераторные зажимы обмоток напряжения и тока присоединяют соответственно к зажиму «а» трансформатора напряжения и к зажиму «И1» трансформатора тока. Для обеспечения безопасности персонала и защиты приборов вторичные цепи измерительных трансформаторов заземляются.

Значение измеряемой мощности в схемах с измерительными трансформаторами рассчитывается путем умножения показаний ваттметра на коэффициенты трансформации. Пусть, например, прибор показал 0,25 кВт, а коэффициенты трансформации составляют 1000/100 В и 600/5 А; тогда мощность нагрузки будет

$$0,25 \frac{1000}{100} \frac{600}{5} = 300 \text{ кВт.}$$

Электродинамические ваттметры с несколькими пределами измерений по току и напряжению имеют неименованную шкалу. В этом случае показания прибора умножают на постоянную ваттметра

$$C = \frac{U_n I_n}{\alpha},$$

где U_n и I_n — номинальные значения напряжения и тока для тех пределов, на которые включен ваттметр; α — полное число делений шкалы.

В схеме непосредственного включения ваттметра генераторный конец обмотки напряжения можно соединить не с генераторным (как по рис. 21а), а с нагрузочным концом токовой обмотки. Оба варианта обладают методической погрешностью: первый не учитывает падение напряжения в токовой обмотке прибора, второй — ответвление тока в потенциальную обмотку. То же относится и к включению ваттметра через измерительные трансформаторы.

Косвенно измерение мощности производится посредством амперметра и вольтметра. Этому методу также свойственна погрешность аналогичного характера из-за включения в результат измерения либо падения напряжения в амперметре, либо тока собственного потребления вольтметра. Во всех трех рассмотренных случаях выбор того или иного варианта соединения зависит от желаемой точности измерения и от мощности нагрузки: при большом сопротивлении ее можно пренебречь падением напряжения в токовой измерительной цепи, при малом — ответвлением тока в потенциальную измерительную цепь.

Если требуется определить реактивную или полную мощность, измеряют активную мощность P ваттметром и фазный угол φ фазометром и рассчитывают реактивную мощность как

$$Q = UI \sin \varphi = P \operatorname{tg} \varphi,$$

а полную как $S = P / \cos \varphi$.

Выпускаются и приборы, измеряющие реактивную мощность непосредственно (варметры).

Мощность трехфазной системы определяется как сумма мощностей отдельных фаз. Применяются схемы с одним, двумя или тремя приборами. При симметричной нагрузке, т. е. когда напряжения, токи и углы сдвига между ними в каждой фазе одинаковы, можно измерить одним прибором мощность любой из фаз и полученное значение утроить. Обычно токовая обмотка включается в рассечку данной фазы, а обмотка напряжения подключается одним концом (генераторным) к этой же фазе, другим — к нулевому проводу. Если нулевая точка недоступна или отсутствует, ее создают искусственно (рис. 22), причем должно быть соблюдено равенство сопротивлений $R_{вт} + R_a = R_b = R_c$, где $R_{вт}$ — сопротивление обмотки ваттметра.

Для измерения реактивной мощности токовую обмотку прибора включают последовательно в одну из фаз, а обмотку напряжения — на две другие фазы (рис. 23). Полная реактивная мощность симметричной трехфазной нагрузки получается умножением полученного показания прибора на $\sqrt{3}$. Эта схема применяется редко, так как даже при незначительной асимметрии дает большую погрешность.

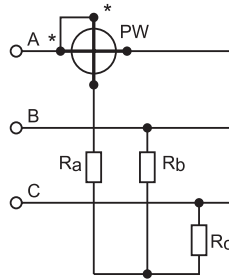


Рис. 22. Измерение реактивной мощности трехфазного тока одним ваттметром

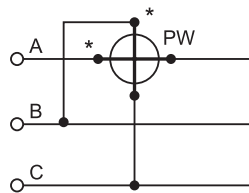


Рис. 23. Измерение мощности трехфазного переменного тока одним ваттметром с искусственной нулевой точкой

При несимметричной нагрузке пользуются либо тремя ваттметрами, показания которых суммируют, либо двумя, включенными по так называемой схеме Арона. Последняя аналогична схеме измерения мощности в каждой из двух произвольно выбранных фаз, с той разницей, что нагрузочные концы потенциальных обмоток ваттметров подключаются не к нулю, а к третьей фазе (рис. 24). Активная мощность нагрузки подсчитывается в этом случае как *алгебраическая* сумма показаний обоих приборов.

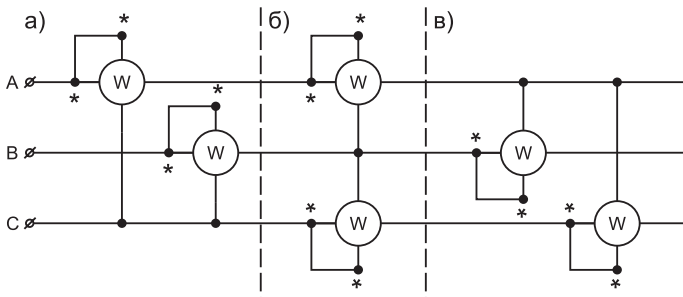


Рис. 24. Измерение активной мощности трехфазного тока по схеме двух ваттметров

Реактивную мощность трехфазной симметричной сети можно измерить и двумя ваттметрами по схеме рис. 25, умножив сумму их показаний на $\sqrt{3}/2$. При неравномерной нагрузке фаз, но симметричной системе напряжений (частичная асимметрия) реактивная трехфазная мощность может быть измерена двумя одинаковыми ваттметрами активной мощности с искусственной

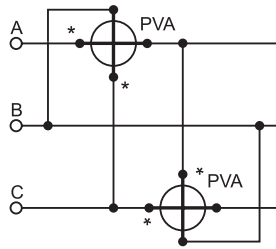


Рис. 25. Измерение реактивной мощности двумя ваттметрами в симметричной сети

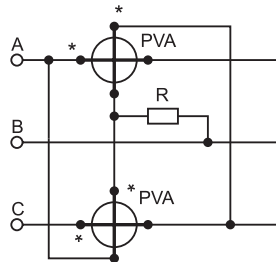


Рис. 26. Измерение реактивной мощности двумя ваттметрами с искусственной нулевой точкой

нулевой точкой (рис. 26). Здесь сопротивление резистора R должно быть равно сопротивлению параллельной цепи ваттметра.

При измерении реактивной мощности в трех- или четырехпроводной асимметричной сети используют три ваттметра, каждый из которых включается в фазы А, В и С аналогично схеме рис. 23. Сумма показаний ваттметров, поделенная на $\sqrt{3}$, дает значение реактивной мощности системы. Необходимо помнить, что в этой схеме напряжение на зажимах цепи напряжения ваттметров в $\sqrt{3}$ раз больше, чем при измерении активной мощности.

На практике часто применяют одно-, двух- или трехэлементные трехфазные ваттметры. Во всех рассмотренных схемах приборы могут быть включены через измерительные трансформаторы.

Следует заметить, что все приведенные выше соотношения по расчету мощности справедливы лишь при синусоидальной форме напряжения и тока. Когда же эти кривые отличаются от синусоиды (из-за включения мощной нелинейной нагрузки, тиристорных преобразователей и т. п.), измеренные значения мощности и энергии могут не совпасть с расчетными. В этих случаях вводится понятие мощности искажений D (от англ. distortion) и полная мощность рассчитывается как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}.$$

Вопросы, связанные с измерением мощности искажений, сложны и здесь не рассматриваются.

2.3.4. Измерение количества электричества и электроэнергии. Для этих целей в цепях постоянного тока служат счетчики магнитоэлектрической, элек-

тродинамической, ферродинамической и электролитической систем. Все счетчики переменного тока могут включаться как непосредственно, так и с измерительными трансформаторами. Учет активной и реактивной электроэнергии в цепях переменного тока промышленной частоты производится счетчиками индукционной и электронной систем. Маркировка счетчиков: О — однофазный, А — активной энергии, Р — реактивной энергии, У — универсальный, 3 или 4 — для трех- или четырехпроводной сети.

По назначению счетчики подразделяются на расчетные и контрольные (для технического учета). При работе с расчетными счетчиками измерительные трансформаторы должны иметь класс точности не ниже 0,5, а для технического учета не ниже 1,0. Нагрузка вторичных цепей измерительных трансформаторов не должна превышать допустимой для данного класса точности. Исходя из этого, ориентировочно принимают допустимое сопротивление соединительных проводов во вторичной цепи трансформатора тока с электромеханическими счетчиками не более 0,2 Ом.

Счетчики активной и реактивной энергии включаются так же, как и ваттметры соответствующего назначения. Маркировка «Г» аналогична «звездочке» у ваттметра, буквой «Н» обозначается зажим, обращенный в сторону нагрузки.

2.3.5. Измерение угла сдвига фаз и частоты. Для определения угла сдвига фаз между током и напряжением, а также коэффициента мощности в однофазной цепи можно воспользоваться показаниями амперметра, вольтметра и ваттметра и рассчитать искомые значения на основании известных соотношений между активной Р, реактивной Q и полной мощностью S:

$$S^2 = P^2 + Q^2; \quad \cos \varphi = P/S.$$

Недостатком такого косвенного метода является необходимость одновременного отсчета показаний трех приборов и производства вычислений. Чтобы найти коэффициент мощности без вычислений, можно воспользоваться номограммой рис. 27а; в случае применения ее для трехфазной симметричной системы исходные значения надо уменьшить в $\sqrt{3}$ раз. Когда активная мощность измеряется методом двух ваттметров, то при симметричной нагрузке можно воспользоваться формулой

$$\operatorname{tg} \varphi = (P_1 - P_2)/(P_1 + P_2)$$

или кривой рис. 27б, где P_1 и P_2 — показания ваттметров.

В приборах непосредственного отсчета — фазометрах часто используются электродинамические логометры, неподвижные катушки которых включаются последовательно с нагрузкой, подвижные — параллельно нагрузке. Можно показать, что при определенном подборе параметров параллельной цепи прибора угол α отклонения его подвижной части будет равен фазному углу нагрузки: $\alpha = \varphi$; $\cos \alpha = \cos \varphi$. Шкала фазометра может быть отградуирована в значениях угла φ или коэффициента мощности $\cos \varphi$ (Д578, Д5000).

Наиболее простым электромеханическим прибором для измерения частоты является электромагнитный резонансный частотомер. Здесь в поле электромагнита располагаются стальные пластинки с различной частотой собствен-

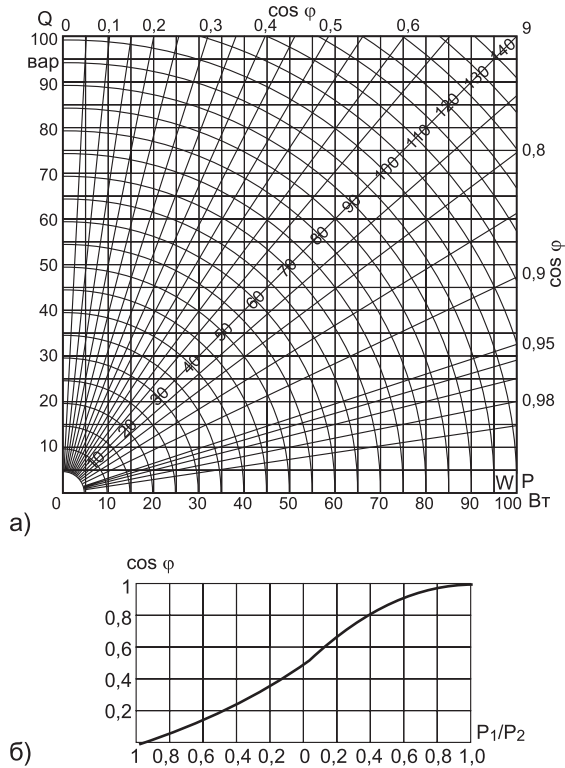


Рис. 27. Графики для определения коэффициента мощности по:
а — активной и полной мощности; б — показаниям двух ваттметров

ных колебаний, значение которой указано на их поверхности. Под действием переменного магнитного поля пластинки дважды за период будут притягиваться к магниту. Та пластина, частота собственных колебаний которой совпадет с двойной частотой тока, будет колебаться с наибольшей амплитудой и появится в окошке шкалы.

Электромеханические частотомеры строятся и на основе электро- или ферродинамического логометра. В них используется то обстоятельство, что индуктивное и емкостное сопротивления изменяются с частотой противоположным образом. Поэтому в цепи подвижных катушек логометра вводятся конденсаторы и дроссели, реактивные сопротивления которых подобраны так, чтобы шкалу прибора можно было отградуировать в единицах частоты (Д506М, Д126 и др.). Тот же принцип положен в основу электромагнитных приборов (Э393 и др.). Переносной фазометр Э120 предназначен для измерения коэффициента мощности в трехфазных сетях при равномерной нагрузке фаз и симметричном напряжении.

Более высоким требованиям к точности измерений в диапазоне низких и средних частот удовлетворяет мостовой метод, согласно которому два плеча моста содержат резисторы, а два противоположных — конденсаторы. При должном выборе элементов и чисто синусоидальном напряжении погрешность измерения не превышает 0,1 %.

Широко распространены измерения частоты и фазы с помощью электроннолучевых осциллографов. В общем случае измерение производится путем непосредственного сравнения на экране осциллографа двух колебаний, частота одного из которых заранее известна. Основными преимуществами способа являются простота, наглядность и возможность получения результата при любой форме колебаний.

Более точные результаты могут быть получены путем сравнения двух колебаний синусоидальной формы с помощью фигур Лиссажу. Отключают напряжение развертки осциллографа и подают на одну из пар отклоняющих пластин синусоидальное напряжение известной частоты, а на другую пару — напряжение измеряемой частоты или фазы. Подбирая частоту образцового генератора, добиваются неподвижности наблюдаемых на экране фигур. Любая из этих фигур вписывается в прямоугольник, стороны которого равны соответственно удвоенной амплитуде каждого из двух сигналов, и подсчитывается число касаний фигуры Лиссажу с вертикальной n и с горизонтальной m сторонами прямоугольника. Если при этом напряжение измеряемой частоты f_x подано на вход Y осциллографа, а напряжение известной частоты f_0 — на вход X , то соотношение частот будет $f_x/f_0 = m/n$, откуда $f_x = f_0 m/n$.

Когда сравниваемые частоты различаются значительно, фигуры Лиссажу становятся запутанными и расшифровка их усложняется. Поэтому обычно стремятся подобрать частоту образцового генератора равной частоте измеряемых колебаний, так как в этом случае фигура имеет простейший вид: прямая, эллипс, окружность (рис. 28). Из рис. 28 явствует также, что вид фигур Лиссажу зависит не только от соотношения частот, но и от фазного сдвига между напряжениями. На рис. 29 показаны фигуры Лиссажу, получающиеся при сравнении двух синусоидальных напряжений с одинаковыми частотой и амплитудой, но отличающихся по фазе. Оси осциллограммы удобнее всего построить, снимая поочередно напряжение со входов X и Y . Тогда фазовый сдвиг можно определить как $\varphi = \arcsin (B/A)$. Из этой формулы можно также определить и чувствительность способа к углу сдвига фаз. Если, например, принять, что максимальное отклонение луча по вертикали составляет 70 мм, а минимальное отклонение луча, которое еще может быть измерено, составляет 1 мм, то наименьшее значение измеряемого угла будет

$$\varphi_{\min} = \arcsin (1/70) \approx 0,8^\circ.$$

Для измерения частоты и фазы, особенно при высоких частотах (звуковые и радиочастоты), используются электронные частотомеры и фазометры, представляющие собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с преобразователем частоты или фазы в постоянный ток. В качестве преобразователя чаще всего применяются электронные ключи.

Работа электронно-счетных частотомеров основана на подсчете числа импульсов измеряемой частоты за определенный интервал времени. Такие приборы обеспечивают высокую точность измерения в самом широком диапазоне частот. Частотомеры типа Э5034 и т. п. позволяют измерить не только частоту в диапазоне от 0,1 Гц до 50 МГц, но и длительность импульсов ($1 \text{ мкс} - 10^5 \text{ с}$), интервал времени ($10 \text{ мкс} - 10^5 \text{ с}$), количество импульсов ($1 - 10^8$), и могут служить также в качестве генератора образцовых частот. Образцовым частотоме-

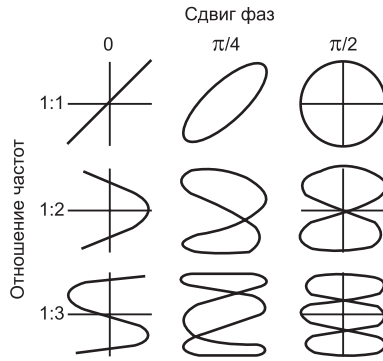


Рис. 28. Фигуры Лиссажу

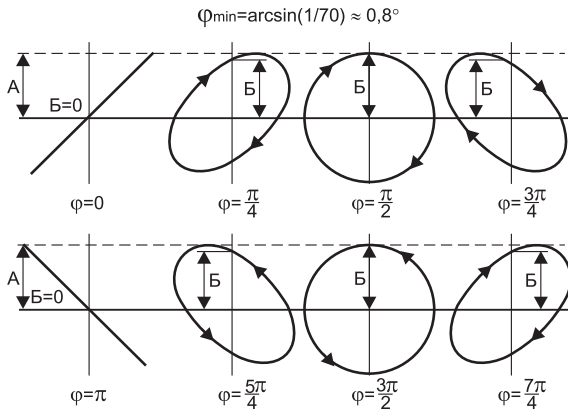


Рис. 29. К определению угла сдвига фаз по фигурам Лиссажу

ром может служить, например, цифровой прибор типа Ф246. Удобны в обращении малогабаритные универсальные частотомеры серии ЧЗ, мультиметры. Вольтамперфазоизмеритель ВАФИ позволяет измерить напряжение, ток и фазовый сдвиг между двумя величинами при частоте 50 Гц.

Очень удобны для практических целей широко применяемые при наладке РЗиА вольтамперфазометры типа ВАФ-85М. Класс точности 4 при измерении силы тока и напряжения переменного тока и 1,5 — при измерении угла сдвига фаз. ВАФ является многопредельным детекторным прибором. Пределы измерения напряжения от 1 до 250 В, тока — до 10 А, угла — до 180°. Измерение тока на пределах 1, 5 и 10 А производится с помощью токосъемной клещевой приставки, охватывающей проводник с током и работающей как трансформатор тока. При измерении малых значений переменного тока на пределах 10, 50 и 250 мА прибор включается непосредственно в рассечку цепи измеряемого тока. При весьма малых значениях измеряемого тока можно ввести в рассечку гибкий проводник и несколько раз пропустить его через окно клещей, не забыв затем разделить показания прибора на число витков в окне. Если же разрыв токовой цепи недопустим, сигнал следует усилить, воспользовавшись, например, усилительной приставкой П-77-1, разработанной в наладочно-монтажном управлении треста «Электроцентромонтаж».

Значения угла отсчитываются по лимбу, закрепленному на оси фазорегулятора. Максимальный ток через измерительный прибор обеспечивается при совпадении по фазе тока и напряжения, подведенных к выпрямителю. При фазном угле 90° ток через прибор равен нулю и положение лимба указывает фазу тока и напряжения. Поскольку прибор может определять как значения напряжения и тока, так и угол сдвига фаз между ними, он может быть использован и для определения мощности. Менее известно то обстоятельство, что с помощью ВАФ можно определить направление и напряженность магнитного поля.

2.3.6. Измерение времени. При наладке часто приходится измерять время срабатывания (отпускания) электромеханических аппаратов — от момента подачи (снятия) напряжения до замыкания или размыкания контактов. Для этой цели чаще всего употребляются электромеханические секундомеры типа ПВ-53Л, П14-2М. Стрелки такого секундомера приводятся в движение электромагнитом или электродвигателем (см. раздел 2, п. 3.7.2), а останавливаются отключением прибора от сети или шунтированием обмотки электромагнита контактами проверяемого аппарата.

Для измерения долей секунды применяют электронные секундомеры (ЭМС-54 и др.), а для еще более тонких измерений — электронные частотомеры (типа ЧЗ и др.) и осциллографы. Если у используемого осциллографа отсутствует масштабная сетка горизонтальной развертки и калибрационные метки, измеряемый интервал времени сравнивают с длительностью импульсов известной частоты, например 50 Гц. Более широкие возможности, чем прибор ЭМС-54, имеет измеритель временных интервалов типа Ф738. Тогда как ЭМС-54 может измерять промежутки времени от 5 до 500 мс, измеритель Ф738 имеет пределы от 1 мс до 10 с и позволяет измерять не только время срабатывания и возврата, но и разность времени срабатывания и возврата контактов реле в любой комбинации. Цифровой измеритель параметров реле Ф291 позволяет реализовать те же функции, но имеет верхний предел измерения 100 с.

2.3.7. Измерение электрического сопротивления. В общем случае цепь переменного тока может содержать активное r и реактивное x сопротивления (x_L — индуктивное, x_C — емкостное). Полное сопротивление цепи определяется как

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2},$$

причем $x_L = \omega L$, $x_C = 1/\omega C$, где ω — угловая частота, L — индуктивность, C — емкость; $\omega = 2\pi f$, при $f = 50$ Гц $\omega = 314$ 1/с.

В наладочной практике чаще всего приходится измерять сопротивление постоянному току r (его иногда называют еще омическим сопротивлением), которое при промышленной частоте незначительно отличается от активного. При повышенных частотах активное сопротивление возрастает и становится заметно больше омического из-за явления поверхностного эффекта — вытеснения тока к поверхности проводника и уменьшения вследствие этого его эффективного сечения.

Наиболее просто сопротивление постоянному току измеряется посредством омметров с измерительным механизмом магнитоэлектрической системы. В простейших конструкциях измеряемое сопротивление подключается последовательно с катушкой измерительного механизма (рис. 30а) или параллельно (рис. 30б), если его значение не превышает 1 Ом. Если считать, что ЭДС источника питания E постоянна, то сила тока через измерительный прибор будет зависеть только от сопротивления R_x , в единицах которого и градуируется шкала прибора.

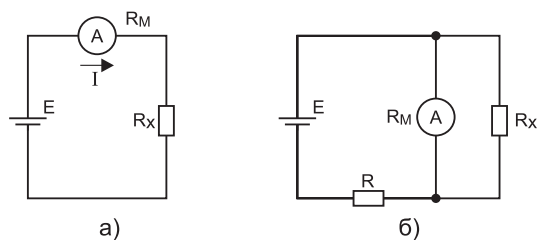


Рис. 30. Схемы омметров:
а — последовательная; б — параллельная

Шкалы приборов при обеих схемах включения неравномерны. Погрешность омметра минимальна в середине шкалы, но и здесь она вдвое больше относительной погрешности амперметра в данной точке. Кроме того, ЭДС источника не постоянна, а при использовании сухого гальванического элемента нужно учитывать, что и внутреннее сопротивление его изменяется с течением времени. Корректировка прибора производится регулируемым магнитным шунтом или переменным резистором. Шунт представляет собой ферромагнитную пластинку переменного сечения, которая шунтирует рабочий воздушный зазор магнитной системы и может перемещаться с помощью ручки на панели прибора. Переменный резистор включается последовательно с батареей. Для регулирования омметра с последовательной схемой цепь измерения (зажимы R_x) замыкают накоротко и устанавливают стрелку прибора на отметку «0», а для параллельной схемы устанавливают стрелку на отметку «∞» при разомкнутой цепи измерения. Замыкание и размыкание цепей производится специальной кнопкой. Омметры с последовательной схемой более пригодны для измерения больших сопротивлений, с параллельной — малых.

Широко применяются омметры постоянного тока типов М371, М41070, позволяющие измерять сопротивления от нескольких ом до нескольких мегаом; класс точности 1,5; масса порядка 0,5 кг. Однако необходимость регулировки является серьезным недостатком таких приборов. Этого недостатка лишены омметры с логометрической измерительной частью. В цепи одной из катушек постоянно включено калиброванное сопротивление, в цепь другой вводится измеряемое сопротивление. Показания прибора от напряжения питания не зависят. При отсутствии тока в катушках стрелка логометра занимает произвольное положение на шкале. Точность таких приборов сравнительно невысока. Логометрические системы постоянного тока находят широкое применение для измерения очень высоких сопротивлений (мегаомметры).

Независимость показаний от напряжения наряду с высокой точностью обеспечивается измерительными мостами, которые могут выполняться как на переменном, так и на постоянном токе. В самом общем случае плечи моста могут содержать полные сопротивления Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 , одна из диагоналей подключается к источнику переменного тока, в другую включается нуль-индикатор (рис. 31). Когда ток через индикаторный прибор равен нулю, говорят, что мост уравновешен. Равновесие моста достигается при двух условиях:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3;$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3,$$

где z — модули полных (комплексных) сопротивлений плеч моста; φ — углы сдвига тока относительно напряжения в соответствующих плечах.

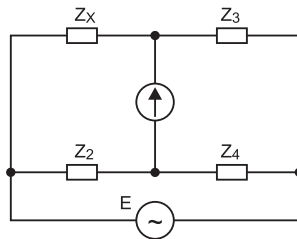


Рис. 31. Принципиальная схема моста постоянного тока

Преимущественное распространение получили мосты постоянного тока — с активными сопротивлениями плеч и питанием от источника постоянного тока (рис. 32). Измеряемое сопротивление R_x включается в одно из плеч моста. Изменяя сопротивление других плеч, добиваются отсутствия тока через индикаторный прибор. Условие равновесия одно:

$$R_x R_4 = R_2 R_3.$$

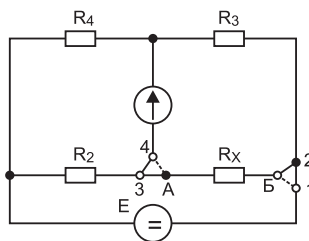


Рис. 32. Принципиальная схема моста переменного тока

Сопротивления плеч моста подбираются с помощью переключаемых или плавно регулируемых резисторов. Индикатором равновесия моста служит гальванометр. Широко употребляемый в наладочной практике, простой в употреблении и сравнительно недорогой омметр типа ММВ, выполненный по схеме одинарного моста постоянного тока (мост Уитстона), питается от бата-

рей, имеет диапазон измерения 0,5 Ом—50 кОм, погрешность до 15 % и массу около 1 кг. Два плеча прибора выполняются из калиброванной проволоки (реохорда), по которой перемещается движок.

При измерении малых (до 10 Ом) сопротивлений четырехплечими (одинарными) мостами на результат измерения оказывают существенное влияние сопротивления контактов и соединительных проводов, которые суммируются с измеряемым сопротивлением. Для уменьшения этого влияния измеряемое сопротивление подсоединяют к мосту по четырехзажимной схеме (см. рис. 32). При измерении сопротивлений от 10 до 10^6 Ом зажимы 1 и 2, а также 3 и 4 замыкаются переключками и резистор, сопротивление которого надлежит измерить, подключается к зажимам 2 и 3 (сплошные линии). В этом случае соединения между точками А и 4, Б и 1 отсутствуют и сопротивление R_x измеряется вместе с сопротивлением контактов и соединительных проводов, по двухзажимной схеме.

Для перехода к четырехзажимной схеме переключки между точками 1 и 2, 3 и 4 снимаются, а точки А и 4, Б и 1 соединяются между собой (штриховые линии); резистор R_x подключается к зажимам 1 и 2, 3 и 4. В этом случае сопротивление провода от R_x к зажиму 2 входит в плечо с сопротивлением R_3 , а от R_x к зажиму 3 — в плечо с сопротивлением R_2 . Сопротивления R_3 и R_2 значительно больше сопротивления проводов. Сопротивление проводов от зажимов R_x к зажимам 1 и 4 входят в диагонали моста.

Тем не менее при измерении малых сопротивлений (менее 1 Ом) погрешность одинарных мостов, обусловленная влиянием сопротивления соединительных проводов и контактов, может быть достаточно велика. Это влияние сводится к минимуму в схеме двойного моста (мост Томсона). В промышленных приборах, с целью расширения пределов измерения, двойные мосты совмещаются с одинарными. Так, мост типа Р329 имеет диапазоны измерений от 1 мкОм (двойной мост) до 1,1 МОм (одинарный мост), одинарно-двойной мост МОД — от 10^{-8} до 10^8 Ом.

Высокую точность можно получить при измерении сопротивления постоянному току методом сравнения R_x с образцовым сопротивлением R_0 (рис. 33), значение которого точно известно. Эти сопротивления могут соединяться как последовательно (рис. 33а), так и параллельно (рис. 33б). Плечо с R_x или R_0 выбирается с помощью переключателя. В каждом случае значение измеряемого сопротивления вычисляется по данным двух измерений и будет соответственно:

$$R_x = R_0 U_x / U_0; \quad R_x = R_0 I_0 / I_x.$$

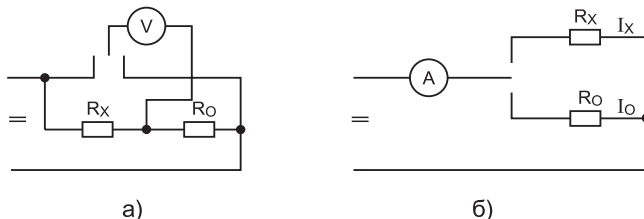


Рис. 33. Измерение сопротивления методом сравнения: а — последовательная схема; б — параллельная схема

Аналогичным образом можно измерить и полное сопротивление на переменном токе. Метод сравнения часто используется в электронных омметрах.

Иногда прибегают и к косвенным способам измерения сопротивления. По методу амперметра — вольтметра непосредственно измеряют силу тока I и создаваемое им падение напряжения ΔU на измеряемом сопротивлении, а значение последнего рассчитывают как $\Delta U/I$. Это бывает целесообразно в случаях, когда сопротивление элемента электрической цепи нелинейно и зависит от параметров тока (силы тока, частоты), протекающего через него, а также при измерении малых сопротивлений, когда для повышения чувствительности необходим большой ток. Использование стабилизированного тока позволяет упростить измерение: в этом случае достаточно измерить только падение напряжения на неизвестном сопротивлении, как это делается, например, в приборе Ф4104.

При точных измерениях следует считаться с внутренним сопротивлением приборов. Поэтому схема рис. 34а более пригодна для измерения больших сопротивлений, когда сопротивлением амперметра можно пренебречь по сравнению с R_x , а схема рис. 34б — для малых, когда сопротивление вольтметра настолько больше R_x , что измеренный амперметром ток лишь незначительно превышает ток через измеряемое сопротивление.

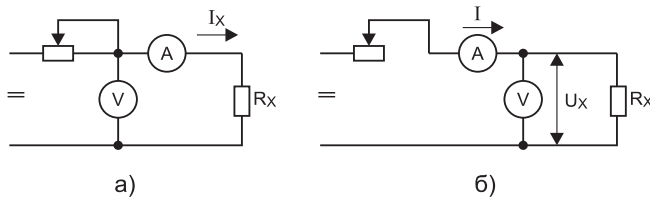


Рис. 34. Схемы измерения больших (а) и малых (б) сопротивлений

Погрешность измерения методом амперметра—вольтметра рассчитывается по выражению

$$\delta_R = \gamma_n U_{\text{п}}/U_x + \gamma_a I_{\text{п}}/I_x,$$

где γ_n, γ_a — класс точности; $U_{\text{п}}, I_{\text{п}}$ — пределы измерений вольтметра и амперметра.

При точных измерениях необходимо также учитывать сопротивления контактов элемента, сопротивление которого измеряется данным методом. С этой целью пару проводников, с помощью которой снимается падение напряжения ΔU , располагают между проводниками, подводщими измерительный ток I (рис. 35).

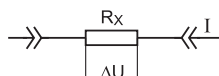


Рис. 35. Учет сопротивлений контактов

Как отмечалось выше, известные трудности встречаются при измерении активного сопротивления цепи, содержащей значительную индуктивность. Выпускаются омметры, учитывающие и эту особенность, например, прибор

типа MMR-600 (610) фирмы SONEL S.A. (Польша). СКБ электротехнического приборостроения (г. Иркутск) разработал и выпускает микрометры типа МИКО, которые благодаря стабильному и достаточно высокому значению измерительного тока позволяют обеспечить измерение весьма малых активных сопротивлений и избежать влияния индуктивности.

2.3.8. Измерение емкости и индуктивности. При измерении емкости конденсаторов следует иметь в виду, что они обладают активными потерями. Как известно, эти потери принято характеризовать тангенсом угла, дополняющего до 90° угол сдвига фаз между током через конденсатор и напряжением на нем ($\operatorname{tg} \delta$). При измерении емкости конденсаторов в цепях РЗА потерями обычно пренебрегают, считая сопротивление конденсатора чисто емкостным: $z \approx x_c$. В этом случае можно принять $x_c = U/I = 1/\omega C$, воспользоваться методом амперметра — вольтметра и рассчитать емкость C . Можно также использовать метод гальванометра и вычислить значение емкости из формулы $Q = CU$, где Q — заряд конденсатора.

Для непосредственного измерения емкости служат микрофарадметры, действие которых основано на зависимости тока или напряжения от включенной в цепь емкости. Более широкое применение получили мосты переменного тока с питанием на фиксированной частоте 400—1000 Гц. При измерении мост балансируют путем попеременной подстройки двух его плеч, а показания считываются по лимбам рукояток переменных резисторов этих плеч (измеритель емкости Е8-3). Малые значения емкостей (сотни, тысячи пикофарад) удобно измерять резонансными методами, когда неизвестная емкость включается в измерительный LC-контур, а наступление резонанса фиксируется чувствительными приборами.

В отличие от конденсатора, пренебречь активной составляющей сопротивления катушки с индуктивностью обычно не удастся. Активное и индуктивное сопротивления ее могут быть одного порядка, а зачастую активное сопротивление даже превышает индуктивное. Только очень грубо можно принимать $z \approx x_L$ и определять индуктивность L из формулы $x_L = \omega L = U/I$.

Достоверные результаты дает применение метода амперметра—вольтметра для определения полного сопротивления z с последующим измерением сопротивления постоянному току r и вычислением индуктивной составляющей x_L . Однако этот способ неточен, так как результат зависит от погрешностей нескольких приборов, формы кривой напряжения и соотношения r/x_L : чем больше это отношение, тем выше погрешность определения x_L .

Достаточно точные результаты можно получить путем осциллографирования тока переходного процесса в цепи катушки индуктивности при ее закорачивании (рис. 36). Для этого через катушку пропускают постоянный ток (тумблер S1) и после того, как он установится, закорачивают катушку контактами тумблера S2 (рис. 36а). При этом осциллографируются ток в катушке и напряжение на ее выводах. Отключение схемы производится в том же порядке: S1, затем S2. Полученные осциллограммы позволяют определить омическое сопротивление катушки по формуле $R_k = U_0/I_0$, где U_0 и I_0 — начальные значения напряжения и тока, а также постоянную времени $\tau_k = L_k/R_k$, откуда $L_k = \tau_k R_k$. Чтобы определить значение τ_k по кривой на рис. 36б, следует найти

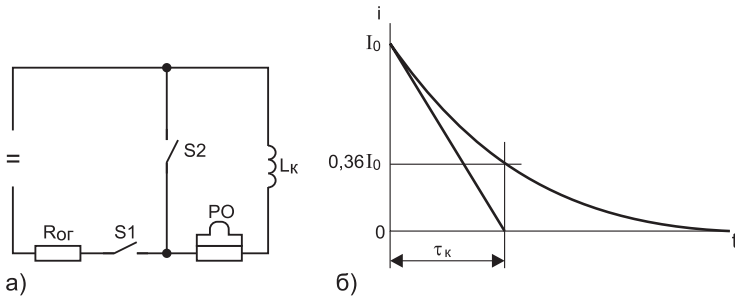


Рис. 36. Определение индуктивности с помощью осциллографа: а — принципиальная схема; б — кривая спада тока в цепи катушки с индуктивностью L_k ; $R_{ог}$ — ограничительный резистор; PO — вибратор магнитоэлектрического осциллографа

точку $\tau = \tau_k$ на горизонтальной оси — либо по соответствующей ей точке $i = 0,36I_0$ на вертикальной оси, либо с помощью касательной, проведенной к кривой тока в точке $i = I_0$.

Для непосредственного измерения индуктивности может служить мост переменного тока, одно из плеч которого содержит образцовую индуктивность, в другое вводится измеряемая, остальные же два плеча образуются реохордом (P5083, P5084 и др.).

Малые индуктивности (порядка миллигенри) могут быть измерены резонансным способом. Здесь измеряемая индуктивность включается параллельно конденсатору переменной емкости, снабженному шкалой, градуированной в единицах индуктивности. Изменяя емкость конденсатора, добиваются резонанса в контуре, о наступлении которого судят по показаниям вольтметра, и производят отсчет по шкале.

Когда рассматривают отдельный контур (или катушку) с током i_1 , то связь между этим током и создаваемым им магнитным потоком (потокосцеплением) определяется собственной индуктивностью L_1 . Если же вблизи данного контура расположен другой с индуктивностью L_2 и током i_2 , то создаваемый последним магнитный поток будет пронизывать не только свой, но частично и первый контур. Точно такое же влияние будет оказывать и первый контур на второй; такие контура (катушки) называются индуктивно- или магнитно-связанными. Связь между током в одной катушке и создаваемым им потокосцеплением в другой характеризуется *взаимной индуктивностью* M , которая, также как и индуктивность L , измеряется в генри (Г).

Если катушки соединить последовательно согласно, то индуктивность цепи будет $L_c = L_1 + L_2 + 2M$, если встречно, то $L_b = L_1 + L_2 - 2M$. На изложенном основываются два способа экспериментального определения взаимной индукции. По одному способу измеряют ЭДС (E), наведенную (индуктированную) в какой-либо из магнитносвязанных катушек при токе I в другой, и находят $M = E/\omega I$. По второму способу катушки соединяют последовательно и измеряют индуктивность цепи при согласном и встречном включении катушек, а взаимную индуктивность вычисляют по формуле $M = (L_c - L_b)/4$. Надо только иметь в виду, что при слабой магнитной связи между катушками этот способ дает большую погрешность, поскольку результат зависит от разности двух величин.

В настоящее время разработаны и выпускаются комбинированные цифровые приборы, позволяющие измерить сопротивление (по четырехпроводной схеме), индуктивность, емкость, тангенс угла потерь и др., например, лабораторный LCR-метр АМ-3002 («АКТАКОМ»).

2.3.9. Измерение магнитных величин. В приборах для измерения характеристик постоянных и переменных магнитных полей магнитные величины преобразуются в электрические с помощью измерительной катушки, витки которой сцепляются с магнитным потоком. Плоскость катушки должна быть расположена перпендикулярно вектору магнитной индукции или напряженности магнитного поля. Если измерительная катушка предназначена для измерения магнитной индукции в образце, то витки ее должны охватывать образец и плотно прилегать к его поверхности. При измерении магнитного поля на поверхности образца катушка должна быть прямоугольного сечения и располагаться так, чтобы ее ось совпадала с вектором напряженности магнитного поля.

2.3.9.1. Измерение постоянного магнитного потока. Чтобы создать импульс тока, вводят измерительную катушку в магнитное поле либо создают его при заранее введенной катушке. Специальный измерительный прибор — веберметр — представляет собой магнитоэлектрический гальванометр с пренебрежимо малым противодействующим моментом. Благодаря этой особенности рамка гальванометра будет перемещаться до тех пор, пока по ней протекает ток, т. е. прибор обладает интегрирующей характеристикой. Ток во вторичной цепи рамки, замкнутой на измерительную катушку, зависит от производной потока, а стало быть при обратной операции — интегрировании — количество электричества, прошедшего через рамку веберметра, и угол отклонения стрелки прибора будут определяться значением потока.

На рис. 37 показано подключение плоской измерительной катушки (S_p) к веберметру (РФ), а на рис. 38 применение веберметра для измерения магнит-

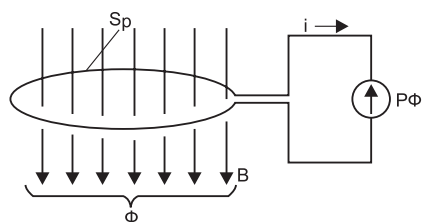


Рис. 37. К принципу измерения магнитного потока веберметром

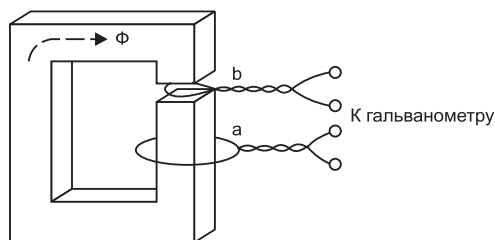


Рис. 38. Измерение магнитного потока (а) и магнитной индукции (б)

ной индукции в воздушном зазоре стального сердечника (измерительная катушка в положении б) и магнитного потока в любом месте (положение а). Веберметр — переносный прибор, шкала его отградуирована в единицах магнитного потока, он прост и удобен в работе. Основными недостатками его являются относительно низкие чувствительность и точность.

Большую точность обеспечивает применение баллистического гальванометра, который также обладает интегрирующими свойствами и предназначен собственно для измерения количества электричества. Но этот способ применим только при условии, что постоянная времени обмотки, создающей магнитный поток, значительно (по крайней мере в 250 раз) меньше периода собственных колебаний баллистического гальванометра (десятки секунд). Баллистическая постоянная гальванометра зависит от сопротивления внешней цепи и ее приходится определять опытным путем, что является недостатком способа.

2.3.9.2. Измерение переменного магнитного потока. Измерить переменный магнитный поток, например, в сердечнике трансформатора, значительно проще, чем постоянный. Если ток в первичной обмотке синусоидальный, то, как известно, ЭДС вторичной обмотки пропорциональна магнитному потоку. Если же форма тока резко отлична от синусоиды, напряжение вторичной обмотки снимается через RC-фильтр. При этом активное сопротивление фильтра должно быть значительно больше емкостного сопротивления конденсатора и выходного сопротивления трансформатора. В этом случае можно считать, что ток в конденсаторе пропорционален вторичной ЭДС, т. е. производной потока, и тогда напряжение на конденсаторе будет пропорционально потоку.

2.3.9.3. Применение преобразователя Холла. Преобразователь (датчик) Холла представляет собой полупроводниковую пластинку в форме параллелепипеда. Если эту пластинку поместить в магнитное поле и через две противоположные боковые грани пропустить постоянный ток, то на другой паре боковых граней возникнет ЭДС, которая при неизменном значении возбуждающего тока будет пропорциональна магнитной индукции. При токе 0,1 А и индукции 1 Т ЭДС Холла получается равной примерно 60 мВ. Преимуществами датчика Холла являются его малые размеры (порядка нескольких миллиметров) и безынерционность.

На основе датчиков Холла работают, например, токовые клещи серий АТА и АТК («АКТАКОМ»): первые дешевле, но требуют применения вольтметра или тестера, вторые имеют встроенный жидкокристаллический индикатор и позволяют измерять, кроме силы тока, также напряжение и активное сопротивление (АТК-2102), мощность (АТК-2200), сопротивление заземления (АТК-4001) и пр.

2.4. Организация измерений

2.4.1. Подготовка измерений. Каждое измерение является частью наладочных работ и требует надлежащей подготовки как материальной базы, так и специалистов. Проведение измерений наладочным персоналом, не имеющим достаточной квалификации и опыта работы с измерительными приборами, может привести к выходу их из строя и (или) неправильным результатам.

Следует знать рабочие значения измеряемой величины и возможный диапазон их изменения. Важно также выбрать наиболее рациональный способ и схему измерения. При этом нередко возникает противоречие между трудоемкостью измерения и имеющимися возможностями, требующее компромиссного решения. Так, например, сложность измерения высокого напряжения испытательной установки (применение делителей, калиброванных разрядников) вынуждает в большинстве случаев производить измерение на стороне низшего напряжения повышающего трансформатора, что вызывает известную погрешность.

Перед измерением следует четко установить, какие требования предъявляются к результатам в отношении их точности. Общее правило: измерять возможно точнее, но не более, чем это необходимо. Например, из имеющихся вольтметров классов 0,5; 2,5; 4,0 для измерения напряжения сети можно выбрать вольтметр класса 2,5.

После выбора определенного способа измерения следует составить схему включения приборов, вспомогательных элементов и произвести приближенный расчет их параметров, например, сопротивления и мощности резисторов.

Средства измерения выбираются в зависимости от рода измеряемой величины (электрические величины, температура, время и пр.), ее возможных значений и требуемой точности. Класс точности прибора должен быть по крайней мере на ступень выше, чем допускаемая погрешность. Так, например, измерение малых сопротивлений (шунтов, секций обмоток электрических машин и трансформаторов) должно производиться с высокой точностью, тогда как к точности измерений сопротивления изоляции особых требований не предъявляется.

При выборе измерительных приборов по классу точности полезно иметь в виду следующее:

а) нецелесообразно стремиться к получению погрешности намного меньше допустимой: если, например, допускается погрешность 5 или 10 %, то нет необходимости выбирать прибор класса 0,2;

б) класс точности прибора не является непосредственным или единственным показателем точности измерений, так как она может зависеть от других причин, вносящих дополнительную погрешность;

в) поскольку класс точности определяется отношением абсолютной погрешности к верхнему пределу измерений, меньшая относительная погрешность обеспечивается при измерении тех значений данной величины, которые ближе к этому пределу. Так, для аналогового вольтметра со шкалой 0—100 В класса точности 1,5 предельная абсолютная погрешность равна 1,5 В, а относительные погрешности при измерении, например, напряжения 25 и 75 В составят соответственно 6 и 2 %.

Применять разрешается только поверенные средств измерения. Запрещается эксплуатация с истекшим сроком поверки. Поверка приборов производится специализированными региональными организациями, подконтрольными Федеральному агентству по техническому регулированию и метрологии.

2.4.2. Выполнение измерений. Непосредственно перед началом работ необходимо проверить схему включения приборов. Когда предельные значения измеряемой величины (напряжения, тока) заранее не известны, приборы следует устанавливать на наименьшую чувствительность (на высший предел).

Если проявляется трение в опорах подвижной части стрелочного прибора, фиксируют среднее из двух показаний: при увеличении и при уменьшении измеряемой величины. Аналогично, при уравнивании измерительных мостов, особенно когда минимум показаний индикатора слабо выражен, рекомендуется подходить к состоянию равновесия с обеих сторон.

Когда снимается функциональная зависимость (например, скоростная характеристика выключателя, вольт-амперная характеристика трансформатора тока), целесообразно сначала наносить полученные значения на график, а не записывать в таблицу протокола. Это дает возможность сразу обнаружить и исключить грубые ошибки и погрешности, не пропустить характерные участки кривой (экстремумы, точки перегиба) и при необходимости увеличить число точек в них. Затем могут быть выбраны нужные точки для занесения в таблицу, если это требуется формой протокола или для последующих расчетов. Когда исследуемая кривая имеет монотонный характер, достаточно зафиксировать 5—7 точек, для прямой — еще меньше. Масштаб графика принимают с пересчетными коэффициентами 2 или 5 или кратными 10. При широком диапазоне изменения величин применяют также логарифмический или полулогарифмический масштабы, т. е. по осям координат (или одной из них) откладывают не абсолютные значения величин, а их логарифмы.

2.4.3. Эксплуатация средств измерения. Приборы, особенно стрелочные, чрезвычайно чувствительны к ударам и сотрясениям, и тем больше, чем выше их чувствительность и точность. Требуется соблюдать следующие рекомендации.

Если рабочее место подвержено ударам, сотрясениям, вибрации, то измерительный прибор должен быть установлен на амортизирующей подставке, прокладке. В противном случае возможна перегрузка подвижной части прибора и деформация ее опор. Рабочая поверхность, на которой устанавливаются приборы, должна быть чистой, без следов влаги, масла, эмульсии и т. п.; должна быть устранена возможность скольжения или падения приборов.

При транспортировании (даже в пределах одного рабочего места) прибора, снабженного арретиром (арретир — механическое устройство для установки на нуль или в транспортное положение стрелки измерительных приборов), подвижная часть должна быть зафиксирована и освобождена только при измерениях. Для демпфирования подвижной системы магнитоэлектрических приборов зажимы их должны быть замкнуты накоротко.

Прибор с несколькими пределами измерения надо вначале включить на самый высокий предел и переключать на более низкий только тогда, когда есть уверенность, что измеряемое значение находится в пределах этого диапазона. Меньший предел можно включить сразу лишь в том случае, если значение измеряемой величины заведомо не превысит его (например, предел 500 В при измерении напряжения в сети 380/220 В).

Универсальный прибор при хранении следует переключить на наибольший предел измерения постоянного напряжения, а при транспортировке — на наибольший предел измерения постоянного тока. При длительном хранении электронных и цифровых приборов должны быть извлечены батарейки питания во избежание повреждения схемы вытекающим электролитом.

Перед использованием новых СИ, особенно зарубежного производства, необходимо внимательно ознакомиться с инструкцией по их применению.

Рекомендуется критически оценивать результат измерения, сравнивая его с расчетными, паспортными и другими данными. Значительное расхождение с ожидаемым результатом может свидетельствовать о наличии неисправностей, дефектов и помочь их выявлению.

Меры безопасности при измерениях в процессе производства конкретных видов наладочных работ указываются в соответствующих инструкциях по их выполнению, а также в фирменных документах СИ. Как правило, все виды измерений при наладке не оказывают влияния на окружающую среду. Необходимо помнить, однако, что некоторые измерения, связанные с подачей повышенного напряжения, могут быть опасны для посторонних людей (измерение тангенса угла диэлектрических потерь, измерение сопротивления изоляции мегаомметром и др.).

3. Проверка элементов РЗА

3.1. Электромеханические реле

3.1.1. Общие сведения.

3.1.1.1. Механическая часть. Подвижная система. Состояние механической части реле и контакторов в целом оценивается путем сравнения с другими аппаратами данного типа.

Отсутствие затирания подвижной системы проверяется подтягиванием и отпуском якоря, после чего система должна свободно и четко вернуться в исходное положение. Если люфт в осях отсутствует или превышает 0,15—0,20 мм, контактный мостик следует заменить. Зазор между полкой втянутого якоря и магнитопроводом должен составлять 0,6—0,7 мм. Упоры должны быть надежно зафиксированы, с достаточным трением в резьбе. Положением одного упора определяется ток срабатывания реле, другого — коэффициент возврата. Необходимое трение, не позволяющее указателю уставки самопроизвольно сдвигаться с заданного положения на шкале, обеспечивается затяжкой гайки или прогибом лапок удерживающей планки, в зависимости от конструкции реле.

3.1.1.2. Контакты. Работа контактов проверяется выборочно или при возникновении сомнений в ее правильности по следующим факторам.

Линейный контакт должен осуществляться по всей ширине, без просвета. При замыкании и размыкании подвижный контакт должен скользить по неподвижному.

Раствор контактов — кратчайшее расстояние между разомкнутыми контактами. Измеряется с помощью щупов. Регулирующим элементом (рис. 39а) является пара винт—гайка 1. Если изменить положение гайки на винте, изменится и расстояние А, т. е. раствор контактов.

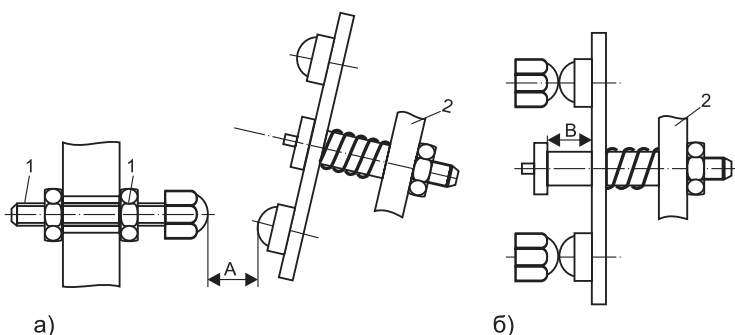


Рис. 39. Измерение раствора (а) и провала контактов (б)

Провал контакта — это расстояние, на которое может сместиться место касания контактов при полном замыкании, если удалить неподвижный контакт. Провал контакта В (рис. 39б) регулируется ходом якоря, а следовательно, и траверсы 2, на которой закреплен подвижный контакт. Поскольку непосредственно измерить провал практически невозможно, контролируют какой-либо другой размер, жестко связанный с провалом. Считается, что контакт следует заменить, если этот размер уменьшился вдвое против первоначального.

Начальное сжатие — это усилие, создаваемое контактной пружиной в точке первоначального касания контактов и характеризующее упругость пружины в разжатом состоянии. Для определения этого усилия между контактами помещают полоску папиросной бумаги и с помощью динамометра оттягивают подвижный контакт до освобождения полоски.

Конечное нажатие характеризует давление контактов при полностью включенном аппарате. При недостаточном нажатии контакты подгорают, при увеличенном — работают нечетко. Проверка производится аналогично.

Значения указанных параметров регламентируются изготовителем аппарата.

Контакты с дефектами поверхности зачищают бархатным надфилем и полируют воронилом (гладкой стальной пластиной). Загрязненные контакты достаточно почистить дощечкой из дерева нехвойных пород. Нельзя протирать контакты керосином, бензином и т. п. жидкостями, от которых остается плохо проводящий налет.

Ход контактов до замыкания не должен быть более 2,5 мм во избежание их отбрасывания при срабатывании и замедления действия реле. Подвижный контакт должен коснуться неподвижного на расстоянии примерно $1/3$ длины последнего от его переднего края и пройти еще $1/3$, так, чтобы исключить возможность заскакивания контактного мостика или упора его в торец неподвижных контактов. Мостики подвижных контактов должны свободно поворачиваться на своих осях. Контактная пружина неподвижного контакта должна касаться переднего упора без давления.

3.1.1.3. Электрические характеристики. Проверку следует производить при токе и напряжении синусоидальной формы. Начинают проверку с определения напряжения или тока срабатывания и возврата, и коэффициента возврата на заданной уставке. При этом следует поднимать напряжение плавно, замыкание и размыкание контактов должно быть четким. Затем убеждаются в отсутствии вибрации подвижной системы реле при изменении напряжения на нем плавно и толчком.

У максимальных реле напряжение (ток) поднимают от уставки до 120 % номинального напряжения или до максимально возможного при КЗ значения тока, причем включение толчком производят ступенями по 0,1 наибольшего значения контролируемой величины. Проверка отсутствия вибрации у минимальных реле производится в обратном порядке — от максимума до уставки. Измеряют параметры срабатывания и возврата вновь и, если они не изменились, считают реле пригодным к эксплуатации. Для уменьшения вибрации контактов реле минимального напряжения вводят якорь глубже под полюса, а у максимального токового реле увеличивают совместный ход контактов.

Ниже рассматриваются особенности наладки конкретных типов реле.

3.1.2. Реле прямого действия.

3.1.2.1. Проверка механической части реле. Проверка производится при снятой крышке привода.

1. Определяют усилие, необходимое для отключения выключателя. С этой целью удобно воспользоваться специальным устройством, содержащим боек и удерживающую пружину (разработка ЦЛЭМ Мосэнерго), при освобождении которой боек ударяет по рычажку отключающего валика привода. Сила удара зависит от натяжения пружины и оценивается по шкале прибора. Испытание начинают при натяжении пружины, заведомо недостаточном для отключения, и затем повышают его до тех пор, пока привод не будет отключаться четко и безотказно 2—3 раза подряд. Полученный результат сравнивают с типовыми данными для таких же приводов. Значительное превышение типовых значений указывает на плохую сборку и регулировку привода, износ или загрязнение деталей и т. п.

2. Проверяют надежность крепления головки ударника реле. Головка ударника должна быть зафиксирована так, чтобы исключалась возможность ее самопроизвольного отвинчивания при вибрации; зазор между нею и рычажком валика автоматического отключения привода должен быть в пределах 5—10 мм.

Приподнимают ударник реле вручную и после расцепления привода определяют свободный ход ударника, который должен быть порядка 2—3 мм.

3. Проверяют состояние выводов катушки реле, зажимов переключателя тока срабатывания. Особое внимание обращается на состояние пружины и надежность контакта между штепселем и мостом переключателя.

Электрические характеристики. Проверка токовых реле.

1. Определяют ток срабатывания реле на заданной уставке. При открытой крышке привода плавно увеличивают ток в катушке реле и фиксируют то его наименьшее значение, при котором головка ударника начнет медленно подниматься вверх и через некоторое время произведет отключение привода.

Следует иметь в виду, что ток срабатывания реле без выдержки времени составляет обычно 80—90 % номинального (т. е. установленного на штепсельном переключателе), а с выдержкой времени он может быть на 5—10 % больше. Дальнейшая проверка ведется при закрытой крышке и полностью собранном выключателе.

2. Устанавливают заданное время срабатывания реле при токе уставки и снимают зависимость времени отключения выключателя от тока в реле. Выдержка времени должна проверяться при заданном токе КЗ для данного присоединения или при 4—5-кратном токе срабатывания, т. е. в независимой части характеристики реле. Это измерение повторяют 3—4 раза и принимают среднее значение, причем разброс не должен превышать $\pm 0,2$ с.

Проверка реле минимального напряжения.

1. Плавно изменяя подведенное к реле напряжение, измеряют напряжение срабатывания и возврата реле. Напряжение срабатывания определяется при отпадании сердечника и должно быть в пределах 65—35 % номинального. Напряжение возврата реле определяется при втягивании сердечника и лежит в пределах 65—85 % номинального.

2. У реле РНВ проверяют время срабатывания на заданной уставке. С этой целью устанавливают номинальное напряжение на катушке реле, а затем отключают его, одновременно запуская секундомер. По истечении выдержки времени реле отпадает, отключается выключатель и останавливается секундомер.

3. Проверка заканчивается опробованием реле под рабочим напряжением. При отключении всех трех фаз со стороны высокого напряжения проверяется действие реле на отключение или включение выключателя. При последующем включении напряжения проверяется возврат сердечника реле в исходное положение.

3.1.3. Реле тока и напряжения.

Реле РТ40/Ф и РТ40/1Д. Реле отключается от вторичной обмотки трансформатора и от конденсаторов, встроенных в реле, посредством имеющейся перемычки. Для проверки конденсаторов их отсоединяют, заряжают примерно до 100 В и через несколько минут разряжают: об исправности судят по характерному щелчку и искре.

Снимают зависимость тока в обмотке реле от тока в первичной обмотке трансформатора (до 20 А) с помощью ЛАТРа и понижающего трансформатора, во вторичную цепь которого вводят резистор сопротивлением 15—20 Ом. Отсутствие вибрации проверяется при токах до $10I_{уст.}$

Реле РТ40/Р. Настраивается аналогично. Снимаются характеристики намагничивания по всем первичным обмоткам насыщающегося трансформатора (зависимость напряжения от тока в первичной обмотке при разомкнутой вторичной) и проверяется срабатывание реле при подаче тока поочередно в каждую из них. Если значение тока срабатывания отличается от номинального, проверяют исправность диодов выпрямительного моста.

Реле РНН57. Производят оценку загробления реле путем сравнения напряжения срабатывания на заданной уставке при частоте 50 и 150 Гц (мощность источника 35—40 В · А). Если отношение этих значений равно или больше 8, резонансный фильтр настроен правильно.

Реле РН58. При существенном отклонении коэффициента возврата от значения, гарантированного изготовителем, следует проверить стабилитроны. При изменении тока через стабилитрон в рабочем диапазоне его значений напряжение на стабилитроне не должно изменяться более чем на 2—5 %; можно ограничиться проверкой для двух значений тока, например, 2 и 5 мА.

У некоторых реле с исполнительным органом типа РТ40 и выпрямителем наблюдается повышенная вибрация и большой разброс вблизи порога срабатывания. Если при этом выпрямительный мост исправен, причиной может быть несогласованность полярности обмоток и остаточного намагничивания стали якоря, которую легко устранить переменной мест проводников на выходе выпрямителя.

Реле максимального тока РТ80, РТ90. Проверка механической части.

При проверке механической части реле необходимо убедиться в следующем:

а) якорь элемента отсечки поворачивается без трения и имеет свободный ход по оси; при срабатывании правый конец его прилегает к магнитопроводу всей плоскостью;

- б) диск не касается полюсов магнитной системы, зазор должен быть равномерным;
- в) диск и рама имеют свободный ход в вертикальном направлении;
- г) зубчатый сектор свободно вращается и имеет люфт в осевом направлении;
- д) при повороте подвижной рамки сектор входит в зацепление с червяком не менее чем на $1/3$ глубины резьбы;
- е) зазоры между контактами соответствуют паспортным данным. Наличие люфтов проверяется по характерному постукиванию.

Зазоры главных контактов можно отрегулировать подгибанием упоров. При этом следует избегать деформации гибких токоотводов, которые не должны создавать дополнительного давления на контакты. Нижний замыкающий контакт должен замыкаться с заметным опережением. Недопустимо даже кратковременное размыкание (отброс) замыкающего контакта после переключения, так как это может привести к разрыву цепи трансформатора тока.

Проверка электрических характеристик. *Индукционный* элемент желательно проверять при питании от линейного напряжения сети, не прибегая к применению понижающего трансформатора во избежание искажения формы кривой тока. *Ток трогания* (ток начала свободного вращения диска) не должен превышать 25 % тока уставки; большее значение свидетельствует о повышенном трении в подпятниках.

Ток срабатывания индукционного элемента (минимальный ток, при котором червяк входит в надежное зацепление с сектором) проверяется на рабочей уставке, при выведенной отсечке и максимальной уставке по времени, и не должен отличаться от уставки более чем на $\pm 5\%$. При нечетком срабатывании («плавании» рамки) следует подогнуть стальную скобу вниз в сторону электромагнита, имея, однако, в виду, что при этом уменьшается коэффициент возврата. Подрегулировка тока срабатывания осуществляется изменением натяжения арретирующей пружины с помощью регулировочных винтов. Если заданная уставка не совпадает со значениями на шкале, выбирают ближайшую меньшую уставку по шкале и добиваются требуемого значения тока срабатывания затяжкой пружины.

Ток возврата измеряется в момент подхода хвостовика сектора к коромыслу якоря отсечки. Если коэффициент возврата оказывается меньше допустимого, следует уменьшить глубину зацепления червячной передачи или несколько отогнуть скобу от сердечника. Если при этом увеличился ток срабатывания, ослабляют натяжение арретирующей пружины.

Коэффициент возврата проверяют дважды: при плавном снижении и при сбросе тока (рис. 40а).

Плавное снижение тока производят при разомкнутом рубильнике S, увеличивая сопротивление резистора R2. Затем при замкнутом рубильнике резистором R1 устанавливают 5-кратный ток срабатывания индукционного элемента и размыканием рубильника вводят в цепь резистор R2, сопротивление которого регулируется так, чтобы ток стал несколько меньше тока возврата, например $0,8I_{\text{ср}}$.

Проверка времени срабатывания индукционного элемента. Подключается электросекундомер и проверяется разброс точек временной характеристики

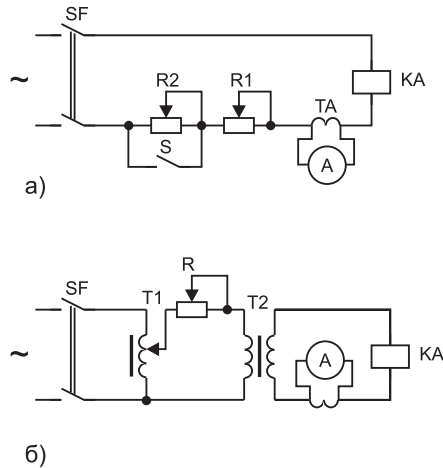


Рис. 40. Схемы проверки:

а — коэффициента возврата; б — кратности тока отсечки реле РТ80, РТ90

на максимальной уставке по времени при полуторакратном токе срабатывания индукционного элемента. Разброс не должен превышать 1 или 2 с для реле соответственно с четырех- или шестнадцатисекундной шкалой. Следует произвести не менее трех отсчетов и принять среднее значение. Повышенный разброс может быть следствием неисправности подпятников или червячной передачи. Заводские характеристики реле изображены на его шкале.

Проверка срабатывания отсечки (рис. 40б). Градуировка шкалы кратности тока отсечки (электромагнитного элемента) справедлива только на тех уставках индукционного элемента, на которых производилась заводская калибровка отсечки. В этом случае погрешность не превышает 15 %, а на других уставках она достигает 30 %. Ток срабатывания отсечки устанавливается в пределах от 2 до 8-кратного значения тока срабатывания индукционного элемента. Технически возможно повысить кратность до 16, но при этом резко возрастает погрешность. Не допускается и применение уставок меньше 2, так как реле может ложно сработать от случайного сотрясения. Время действия отсечки колеблется от 0,04 до 0,20 с.

Проверку производят на рабочей уставке индукционного элемента. При максимальной уставке по шкале времени быстро (во избежание перегрева обмотки реле) устанавливают ток, близкий к заданной уставке отсечки, и с помощью регулировочного винта отсечки добиваются ее срабатывания. Для более точного определения разброса тока срабатывания отсечки подают ток толчками с интервалом 5—10 с, немного снижая ток при каждом включении до тех пор, пока отсечка перестает срабатывать. При этом значении тока производят несколько включений длительностью по 2—3 с каждое.

Если из 3—4 включений подряд отсечка не сработала ни разу, следует немного увеличить ток и через 1 мин повторить включения с интервалом 10 с. Значение тока, при котором отсечка работает хотя бы один раз из 10, называют начальным током срабатывания. Током надежного срабатывания отсечки считается то минимальное значение его, при котором отсечка работает 10 раз подряд. Разница между этими значениями тока (разброс) характеризует

механическое состояние узла отсечки. Повышенный разброс, а также вибрация якоря электромагнитного элемента являются признаками неисправности: перекоса или искривления оси якоря отсечки, большого осевого люфта, перекоса или затирания якоря.

Когда ток срабатывания отсечки значительно отличается от уставки, корректируют срабатывание ее на уставке 2 с помощью регулировочной головки и вновь проверяют ток срабатывания отсечки на уставках 2 и 8.

Если ток КЗ превышает уставку отсечки более чем в 2 раза, следует убедиться в отсутствии вибрации якоря электромагнитного элемента в диапазоне от двухкратного до значения, соответствующего максимальному току КЗ. Ток подают короткими импульсами (во избежание перегрева обмотки), начиная от максимального, а об отсутствии вибрации судят по тому, что при этом не отпадает промежуточное реле, подключенное через контакты проверяемого. Вибрация вызывается теми же механическими дефектами, что и повышенная погрешность.

Если отсечка не используется, ее необходимо вывести.

3.1.4. Реле времени. Реле РВ100, РВ200. Механическая часть.

1. Часовой механизм должен быть установлен так, чтобы при втянутом якоря, на максимальной уставке по времени, между рычагом, связанным с якорем, и заводным рычагом (роликом) часового механизма был зазор 0,5—1 мм.

2. Убеждаются в том, что при трехкратном запуске вручную часового механизма не прослушиваются перебои и срывы в работе, а планка с подвижными контактами перемещается равномерно вдоль всей шкалы.

3. Касание подвижного мгновенного контакта должно происходить примерно по центру неподвижного. Зазор между мгновенными контактами должен быть не менее 1,5 мм для реле РВ113—РВ143 и 2,5 мм для остальных. Регулировка зазора осуществляется подгибанием неподвижных контактных пластинок.

4. Прогиб пластины мгновенного переключающего контакта должен составлять (в средней части) при верхнем ее положении 0,5—1,0, при нижнем 1—2 мм.

5. Поперечный люфт якоря в гильзе должен быть около 0,5 мм, а люфты направляющего рычага якоря в пластмассовой колодке 1—1,5 мм. Все люфты, зазоры, прогибы проверяются визуально.

Электрические характеристики.

1. Измеряют сопротивление цепи обмотки с добавочным резистором при отпущенном и подтянутом (вручную) якорем. Результаты измерения должны отличаться на значение сопротивления резистора.

2. Искрогасительный контур проверяется на исправность его элементов. Способность конденсатора сохранять заряд проверяется по искре при разряде (напряжение заряда около 100 В, разряд — через 3 мин). Контакты, управляющие данным реле, не должны искрить.

3. Проверяют напряжение срабатывания и возврата при питании схемы от ЛАТРа или потенциометра, сопротивление которого выбирают на порядок меньше сопротивления реле. Класс точности вольтметров — не ниже 1,5. Напряжение срабатывания реле РВ100, РВ217—РВ248 определяют при подаче

напряжения толчком, напряжение возврата — при плавном снижении напряжения. Напротив, у реле РВ215—РВ245 напряжение срабатывания определяют при плавном снижении напряжения, а напряжение возврата — при подаче напряжения толчком. В случае включения реле через добавочные резисторы напряжение срабатывания и возврата определяют с этими резисторами. Измерения следует производить по 3 раза и брать среднее.

4. Когда напряжение срабатывания или возврата выходит за нормируемые пределы или наблюдается повышенная вибрация, проверяют выпрямительное устройство. При обнаружении дефекта диоды (выпрямительный мост) или резистор заменяют.

5. Проверка времени срабатывания производится на рабочей уставке, если она остается неизменной, или на всех уставках, если в период эксплуатации реле уставка может быть изменена оперативным персоналом. Измерения производятся электросекундомером, при номинальном напряжении.

6. Время срабатывания и время замкнутого положения проскальзывающих (временно замыкающих) контактов измеряется три раза и принимается среднее значение. Для фиксации показаний секундомера при измерении времени срабатывания целесообразно использовать промежуточное реле, которое запускает секундомер при замыкании проскальзывающего контакта и останавливает его при размыкании этого контакта. Продолжительность замкнутого состояния проскальзывающего контакта регулируется изменением провала неподвижных контактов.

Разброс времени срабатывания (разность между максимальным и минимальным временем срабатывания) определяется как среднее из трех измерений на одной и той же уставке при номинальном напряжении. Повышенный разброс свидетельствует о неисправности часового механизма. Полученные значения должны находиться в следующих пределах, с:

| | | | | |
|---|-----------|---------|-----------|---------|
| Максимальная выдержка времени | 1,3 | 3,5 | 9,0 | 20,0 |
| Разброс времени | 0,06 | 0,12 | 0,25 | 0,80 |
| Время замкнутого состояния проскальзывающих контактов | 0,05—0,12 | 0,1—0,4 | 0,25—0,75 | 0,6—1,6 |

Реле РВМ-12, РВМ-13. Механическая часть.

1. Проверка микродвигателя, надо иметь в виду следующее. При напряжении на статоре 55 В ротор двигателя должен вращаться с синхронной частотой 500 об./мин и надежно входить в зацепление с зубчатым колесом. После отключения тока ротор должен четко опуститься на нижний упор.

2. Рама с подвижными контактами должна свободно вращаться в подшипниках и иметь осевой люфт 0,2—0,4 мм.

3. Такой же люфт должна иметь промежуточная ось редуктора. В зацеплении с ведущей шестеренкой двигателя не должно быть затирания. Изменение зазора в зацеплении производят перемещением двигателя.

4. Воздушный зазор между накладками пластин неподвижных контактов в их разомкнутом состоянии должен быть 3,4—4,0 мм.

Электрические характеристики.

1. Измеряют ток срабатывания и возврата при питании каждого насыщающегося трансформатора и подаче тока толчком.

2. Проверяется разброс времени срабатывания реле на последней уставке шкалы при полуторакратном токе срабатывания. При изменении тока в первичной обмотке насыщающегося трансформатора до 20-кратного номинального разброс должен быть не более 0,12 с у реле РВМ-12 и 0,25 с у реле РВМ-13.

3. Надежность работы контактов и отсутствие вибрации проверяется при поочередном питании каждого насыщающегося трансформатора.

4. Не допускается работа более двух контактов с одинаковыми уставками, а также установка двух проскальзывающих контактов в крайнее левое (замкнутое) положение.

3.1.5. Промежуточные и указательные реле. Эти реле не имеют специальных устройств для изменения электрических параметров и поэтому регулировку механизма реле и проверку его электрических характеристик следует производить одновременно. Проверяют механическую часть и контакты, в частности:

- 1) легкость хода якоря, четкость возврата в исходное положение;
- 2) зазоры между якорем и сердечником;
- 3) люфты подвижных частей;
- 4) положение подвижных контактов относительно неподвижных;
- 5) межконтактные зазоры, провалы, совместный ход замыкающих, размыкающих контактов;
- 6) одновременность замыкания, размыкания контактов — посредством медленного перемещения от руки якоря реле.

Электрические параметры связаны с характеристиками механической части и контактной системы следующим образом.

1. При уменьшении зазора между якорем и сердечником уменьшается напряжение (ток) и время срабатывания реле.

2. При уменьшении конечного зазора уменьшается напряжение (ток) возврата и увеличивается время возврата реле.

3. При ослаблении натяжения возвратной пружины уменьшается напряжение (ток) и время срабатывания, уменьшается напряжение (ток) и увеличивается время возврата реле.

4. Увеличение числа замыкающих контактов ведет к повышению напряжения (тока) и уменьшению времени возврата реле.

5. Увеличение числа размыкающих контактов приводит к уменьшению напряжения (тока) и времени срабатывания реле.

Характеристики механической части и контактной системы отдельных *промежуточных* реле.

Реле РП23, 25. Межконтактный зазор должен составлять не менее 2,5 мм; у реле РП23 между ограничителем хода якоря и самим якорем должен быть зазор 0,5—2 мм. В обесточенном состоянии реле РП25 зазор между хвостовиком скобы якоря и выступом упорной колодки должен составлять 0,5—0,8 мм; при втянутом якоре подвижная контактная система должна иметь свободный ход

0,5—1,5 мм; зазоры между полюсами сердечника и якорем должны отсутствовать. Совместный ход контактных пластин — около 1 мм.

Реле РП210. Зазор между якорем и сердечником обесточенного реле — не более 1 мм, между замыкающими контактами — не менее 1 мм; провал контактов — не менее 0,3 мм.

Реле РП220. При обесточенном реле зазор между якорем и немагнитной прокладкой переднего полюса должен быть около 1 мм; регулировка производится упорным винтом. Зазор между контактами должен быть не менее 1 мм.

Реле РП230. Провал контактов должен быть в пределах 0,7—1,0 мм.

Реле РП250. Межконтактный зазор должен быть не менее 2,5 мм, совместный ход контактов — не менее 0,5 мм, зазор между якорем и концом скобы магнитопровода примерно 2,4 мм. В начальном положении траверса должна упираться в якорь, а после срабатывания иметь свободный ход 0,5—1,5 мм.

Регулирование межконтактного зазора и совместного хода контактов осуществляется перемещением неподвижных контактов. Корректировать время действия реле можно размещением и количеством демпферных шайб: уменьшение их числа вызывает сокращение времени срабатывания и возврата, а приближение к воздушному зазору — увеличение времени срабатывания реле.

Реле РП321, 341, 342. Ход якоря должен быть 3—4 мм, осевой люфт около 0,5 мм. У реле РП321 зазор между изоляционной рамкой и подвижными пластинами переключающих контактов при отпущенном якоре должен быть 0,5—1,0 мм, а между замыкающими контактами — примерно 2,5 мм. Зазор между замыкающими контактами повышенной мощности должен быть 1,5—2, а между размыкающими — не менее 2 мм.

Положение якоря в притянутом состоянии регулируется перемещением магнитопровода, ход якоря — подгибанием упоров. Грубую регулировку межконтактных зазоров выполняют подгибанием язычка хвостовика якоря, тонкую — подгибанием контактных пластин.

Реле промежуточные двухпозиционные (РП8, 9, 11, 12). Зазоры между контактами, выведенными на зажимы цоколя, должны быть не менее 1,8 мм, а между контактами в цепях катушек 1,0—1,3 мм.

Электрические характеристики.

1. Напряжение срабатывания по основной обмотке (посредством которой реле выполняет свою основную функцию в схеме РЗиА) должно быть не более 70 %, напряжение возврата — не менее 5 % номинального (для реле с замедлением на возврат допускается 1 %).

2. Определяют ток (напряжение) удержания по дополнительной обмотке, выполняющей вспомогательные функции (удержание реле, торможение и пр.). Для этого подают номинальное напряжение (ток) на основную и дополнительную обмотки, отключают основную обмотку и плавно снижают напряжение (ток) на дополнительной обмотке. Минимальные значения параметров, отсчитываемые в момент возврата реле, должны быть: ток удерживания — не более 80, а напряжение не более 70 % номинального значения.

3. При плавном снижении напряжения (тока) основной обмотки якорь реле отпадать не должен, в противном случае следует проверить полярность обмоток.

4. Определяют время действия реле, для которых задана уставка по времени.

5. Проверяется работа реле при напряжении 80 и 110 % номинального.

В реле МКУ-48 начальное расстояние порядка 2,5—2,8 мм между сердечником и якорем регулируют перемещением специального упора, в отверстие которого входит конец якоря. Конечное расстояние не регулируется: якорь ложится на край магнитопровода. Чтобы якорь не залипал, на нем установлен медный упор. Ход контактов равен 2—3 мм, регулировка производится подгибанием упорных пружин.

Во всех схемах и конструкциях реле, а особенно при шунтировании обмоток, время замедления зависит от продолжительности нахождения его под напряжением. В некоторых схемах защиты дополнительное замедление при возврате реле достигается включением параллельно его обмотке конденсаторов или резисторов. Кроме того, в полной схеме защиты обмотка проверяемого реле может шунтироваться обмотками других реле, резисторами, конденсаторами и пр. Необходимо поэтому проверку времени замедления реле в схеме устройства РЗА проводить с учетом возможного шунтирования его обмотки и обеспечить требуемое или заданное время приложения напряжения.

Указательные реле РУ21, РУ1. Барабанчик реле должен вращаться свободно. Глубина зацепления между зубом скобы барабанчика и выступом якоря должна быть 1,0—1,5 мм. Люфт якоря регулируется перемещением скобы, зацепление — подгибанием регулировочной скобы.

Напряжение срабатывания реле РУ21 при параллельном включении — до 80 % номинального, ток срабатывания при последовательном включении близок к номинальному (около 200 ампервитков). Напряжение срабатывания реле постоянного тока РУ1 — не более 70 %, переменного — не более 80 % номинального; ток срабатывания не превышает номинального значения.

3.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит

3.2.1. Реле дифференциальных защит серий РНТ и ДЗТ10.

1. Осмотр и проверка механической части, изоляции проводят так же, как и для электромагнитных реле.

2. Проверяют срабатывание исполнительного органа — реле РТ-40, для чего последнее отключают, сняв перемычку. Подав в реле синусоидальный ток, измеряют напряжение и ток срабатывания (в начальный момент втягивания якоря), а также коэффициент возврата. Значения этих величин нормируются в пределах, соответственно: 3,5—3,6 В; 0,16—0,17 А; 0,80—0,85. Момент срабатывания реле можно определить по характерному звуку и скачку стрелки прибора; измерения следует производить приборами класса 0,5.

Для обеспечения синусоидальной формы кривой тока при использовании нагрузочного трансформатора или ЛАТРа рекомендуется последовательно с обмоткой реле вводить резисторы, минимальное сопротивление которых выбирается в зависимости от числа витков первичной обмотки реле:

| | | | | | | | |
|----------------------|-----|----|----|----|----|-----|-----|
| Число витков обмотки | 5 | 10 | 20 | 40 | 60 | 120 | 180 |
| Сопротивление, Ом | 1,5 | 3 | 5 | 10 | 15 | 30 | 50 |

Если реле требует регулировки, нужно отвести указатель уставки вправо до отказа и при токе $0,16-0,17$ А выбрать такое начальное положение якоря относительно полюсов магнитопровода, при котором напряжение на обмотках реле было бы $3,5-3,6$ В. Регулировка производится перемещением магнитопровода, коррекция — левым упорным винтом. Затем указатель устанавливают на заводскую риску и изменением натяжения противодействующей пружины добиваются срабатывания реле при указанном значении тока, после чего вновь измеряют напряжение срабатывания.

Коэффициент возврата регулируется конечным положением якоря (с помощью правого упорного винта) и изменением нажатия контактных пружин. Полка якоря должна заходить под полюсы электромагнита не далее чем на $2/3$ их ширины, а зазоры между ними должны быть одинаковыми и равными $0,3-0,4$ мм. Во избежание вибрации подвижной системы между упорными винтами и якорем сохраняется небольшой (до 1 мм) зазор.

3. Проверяют МДС срабатывания реле поочередной подачей синусоидального тока в рабочие обмотки, предварительно набрав для них максимальное число витков на колодках НТТ. В цепи короткозамкнутой обмотки устанавливается заданное значение сопротивления R_k . Проверку реле ДЗТ производят при отсутствии тока в тормозных обмотках. МДС каждой обмотки должна составлять 100 ± 5 Ав. Подрегулировку выполняют резистором $R_{ш}$, шунтирующим вторичную обмотку НТТ. При значительных отклонениях МДС от нормы следует проверить правильность выполнения ответвлений обмотки, сравнивая распределение напряжения по ответвлениям данной и аналогичной обмоток.

4. Проверяют короткозамкнутую обмотку w_k реле РНТ: следует убедиться, что при изменении сопротивления резистора R_k от нуля до рабочей уставки и замкнутой цепи этой обмотки МДС срабатывания почти не изменяется, а при размыкании цепи — уменьшается на $20-30$ %. Если эти условия не соблюдаются, то при токе в первичной цепи, близком к току срабатывания, ток в цепи обмотки w_k будет практически отсутствовать.

5. Проверяют отсутствие взаимоиндукции между тормозной и вторичными обмотками реле ДЗТ. С этой целью отключают исполнительный орган от НТТ и в тормозную обмотку с полным числом витков подают ток, соответствующий максимально допустимому току КЗ. При этом напряжение на разомкнутой вторичной обмотке реле не должно превышать 4 % напряжения срабатывания исполнительного органа, т. е. $0,14$ В.

6. Проверяют коэффициент надежности (иначе — коэффициент отстройки) на рабочей уставке. Первичный ток синусоидальной формы подается в рабочую обмотку реле РНТ или в последовательно соединенные рабочую и тормозную обмотки реле ДЗТ. У реле ДЗТ10 число витков этих обмоток выбирается с тем условием, чтобы коэффициент торможения был равен $0,35$; у реле ДЗТ11 число витков тормозной, рабочей и уравнивающей обмоток выбирают равным соответственно 24 и $35 + 34$.

Определяют первичный ток срабатывания реле, фиксируют якорь исполнительного органа в исходном положении и измеряют вторичные токи в цепи обмотки исполнительного органа при значениях первичного тока в 2 и 5 раз больше тока срабатывания. Соответствие рассчитанных значений коэффици-

ентов надежности приведенным выше нормам является важным критерием правильной настройки реле: меньшие значения свидетельствуют о снижении надежности работы реле при внутренних повреждениях, большие — об ухудшении отстройки реле от бросков намагничивающего тока.

7. Проверка тормозных характеристик. При внешних повреждениях тормозные обмотки НТТ обтекаются синусоидальным током, а первичные (рабочие) — несинусоидальным. При внутренних повреждениях тормозные и рабочие обмотки обтекаются синусоидальным током, причем угол между векторами токов в тормозной и рабочей обмотках может изменяться в пределах $0\text{—}360^\circ$. Тормозные характеристики, представляющие собой зависимость МДС срабатывания от МДС торможения, снимаются при пропускании по обеим обмоткам синусоидального тока.

Тормозные характеристики проверяют по контрольным точкам при наибольшем и наименьшем торможении. Торможение наиболее эффективно при угле между векторами токов в рабочей и тормозной обмотках в пределах $0 \pm 30^\circ$, наименьший эффект будет при угле $30 \pm 90^\circ$. Проверка контрольных точек, соответствующих торможению, производится при наименьшем торможении, соответствующих срабатыванию, — при наибольшем торможении. На практике выбирают значения углов 0 и 90° между напряжениями на обмотках: так, если на рабочую обмотку подано напряжение между фазами А и В, то тормозную обмотку подключают на то же напряжение или на фазу С. Если полученные точки тормозной характеристики отличаются от типовой больше чем на 10 %, необходимо использовать фазорегулятор, а более чем на 5 % — снять полные тормозные характеристики (4—5 точек до МДС торможения 800—1000 Ав). Большое различие характеристик может свидетельствовать о неисправности тормозной обмотки или о других дефектах.

8. Проверяют надежность контактов реле при изменении тока рабочей обмотки в диапазоне, соответствующем (1,05-5) МДС срабатывания. Дальнейшее увеличение тока не требуется ввиду насыщения НТТ. Испытание проводится как при плавном подъеме первичного тока, так и толчком при разных значениях тока.

Проверяется однократность замыкания и размыкания контактов, отсутствие вибрации и искрения. Предварительная регулировка контактов и устранение вибрации производятся без тока, окончательная — с нагрузкой, на которую они работают в схеме защиты. По окончании испытания размагничивают сердечник НТТ путем поочередного повышения и снижения первичного тока в пределах от нуля до пятикратного тока срабатывания.

9. Измеряют ток срабатывания реле на рабочих уставках со стороны каждого плеча защиты. Для реле ДЗТ измеряют ток срабатывания с включенным торможением (если возможно) и без него.

3.2.2. Реле направления мощности. Механическая часть.

1. В случае затирания осей в подпятниках их выворачивают, очищают от загрязнений с помощью заостренной палочки из дерева нехвойных пород. При установке на место регулируют сначала положение нижнего подпятника, потом верхнего.

2. Проверяют свободный ход подвижной системы, для чего отпускают возвратную пружину и снимают контактную плату. Отводят до упора подвижный

контакт и отпускают его, после чего подвижная система должна сделать 8—10 полных колебаний; меньшее число будет свидетельствовать о затирании (дефекты подпятников, погнутость оси, засорение зазоров, задевание за полюса сердечника).

3. Контактная колодка должна быть установлена так, чтобы угол встречи контактов составлял 35—40°. С увеличением этого угла возрастает разрывная способность контактов, но появляется опасность их отскока и подгорания. Совместный ход контактов должен быть в пределах 1—1,5 мм. Регулировка осуществляется прогибом гибкой пружины неподвижного контакта, которая должна опереться на конец упорной пластины только в конце совместного хода контактов. Расстояние между подвижным и неподвижным контактами должно быть 1—1,5 мм.

4. Возвратная пружина должна иметь правильную спиральную форму, зазор между витками должен оставаться равномерным при повороте подвижной системы в пределах, ограниченных упорами. Положение витков пружины корректируется легким изгибом поводка, к которому крепится ее внешний конец.

Электрическая часть.

1. Определение потребляемой мощности. С этой целью измеряют ток в обмотке напряжения при номинальном (100 В) напряжении на ней и падение напряжения на обмотке тока при номинальном токе реле.

2. Проверка и устранение самохода. Самоход — вращение подвижной системы реле, вызываемое только током или только напряжением. Самоход в сторону размыкания контактов заглубляет реле, результатом чего может стать отказ защиты, а самоход в сторону замыкания может привести к ложному действию ее. Самоход по напряжению проверяют при разомкнутой цепи токовой обмотки, самоход по току — при замкнутой накоротко обмотке напряжения. Напряжение поднимают от 0 до 110 В, а ток подают толчками, постепенно увеличивая его от номинального до максимального значения, соответствующего КЗ на шинах подстанции.

Вращающий момент самохода появляется в результате несимметрии магнитной системы. Устраняют его, как правило, поворотом стального сердечника вокруг своей оси. Допускается незначительный самоход, который можно компенсировать закручиванием противодействующей пружины на угол не более 15°.

3. Проверка зоны действия, угла максимальной чувствительности и однополярных зажимов реле (рис. 41) производится при напряжении 100 В, номинальном токе и рабочей натяжке пружины. Посредством фазорегулятора изменяют угол между током и напряжением от 0 до 360° и обратно, отмечая по фазометру значения углов φ_1 и φ_2 , при которых реле замыкает контакт. Угол максимальной чувствительности определяют как

$$\varphi_{м.ч} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

Если отклонение $\varphi_{м.ч}$ от паспортного значения не превышает 5°, то однополярные зажимы обозначены правильно.

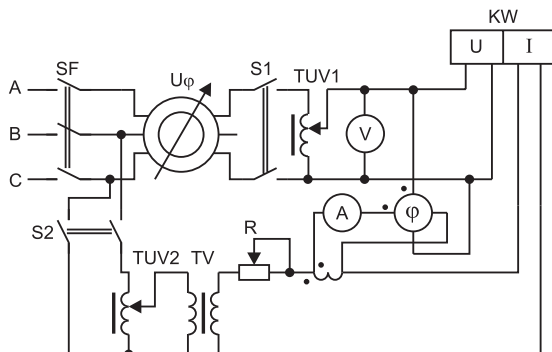


Рис. 41. Схема определения электрических характеристик реле направления мощности: TUV1, TUV2 — автотрансформаторы; TV — нагрузочный трансформатор; U_ϕ — фазорегулятор

Получить более наглядную картину и определить зоны действия и отказа (заклинивания) реле можно построением угловых характеристик, как, например, на рис. 42. Для этого на миллиметровой бумаге откладывают вектор напряжения U_p и из начала его как из центра проводят окружность радиусом, равным длине вектора. Этот вектор принимают в качестве оси, от которой ведут отсчет углов в направлении вращения часовой стрелки.

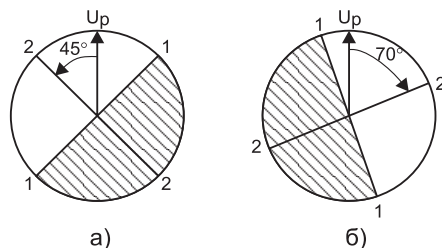


Рис. 42. Упрощенные угловые характеристики реле типов РБМ171 (а) и РБМ178 (б): 1—1 — линия нулевых моментов; 2—2 — линия максимальных моментов

На окружности с помощью транспортира отмечают точки, соответствующие замыканию и размыканию контактов, и соединяют их прямой. Это — линия нулевых моментов, а перпендикулярная ей линия, проходящая через центр окружности, — линия максимальных моментов. Полуокружность, соответствующая замкнутому состоянию контактов, — это зона действия реле на срабатывание (незаштрихованный полукруг); другая полуокружность — зона действия на заклинивание (заштрихованный полукруг). Угол между вектором напряжения U_p и линией максимальных моментов 2—2 и есть угол максимальной чувствительности реле.

4. Проверка чувствительности (мощности срабатывания) реле. Производится при рабочей затяжке возвратной пружины, номинальном токе и угле между током и напряжением, равном углу максимальной чувствительности. Угол рабочей затяжки пружины находится в пределах 90—180°, для реле РБМ обычно около 120 °С.

Плавно повышая напряжение, добиваются срабатывания реле, затем снижают напряжение и определяют коэффициент возврата, который должен быть не ниже 0,6. Чувствительность, т. е. минимальная мощность срабатывания реле, определяется по выражению

$$S_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} I_{\text{р.н}},$$

где $U_{\text{ср}}$ — напряжение срабатывания, $I_{\text{р.н}}$ — номинальный ток реле. Мощность срабатывания не должна превышать значений, гарантируемых изготовителем.

Когда фазорегулятор и фазометр отсутствуют, разрешается вести проверку при углах, отличающихся от угла максимальной чувствительности, так как при небольшой разнице в значениях угла мощность срабатывания существенно не изменяется.

5. Проверка работы контактов реле выполняется при подведении к нему мощности срабатывания, а также при подведении и сбросе обратной мощности. Нагрузка контактов должна быть такой же, как и в рабочей схеме защиты. Значения мощности выбирают в пределах $1,2S_{\text{ср}}$ до максимального, которое подсчитывается по следующим формулам:

для защиты от междуфазных КЗ

$$S_{\text{м}}^{(2)} = \frac{3U_{\text{л}} I_{\text{к.м}}^{(3)}}{4n_{\text{т}} n_{\text{н.т}}},$$

для защиты от замыканий на землю

$$S_{\text{мо}} = \frac{9U_{\text{о}} I_{\text{о}}}{n_{\text{т}} n_{\text{н.т}}},$$

где $S_{\text{м}}^{(2)}$ — максимальная мощность, подводимая к реле при двухфазном КЗ у шин подстанции в зоне защиты; $I_{\text{к.м}}^{(3)}$ — ток трехфазного КЗ в максимальном режиме; $3U_{\text{о}}/n_{\text{н.т}} = 100$ В и $3I_{\text{о}}/n_{\text{т}}$ — соответственно напряжение и ток нулевой последовательности в цепи реле при однофазном КЗ вблизи шин подстанции в зоне защиты; $n_{\text{т}}$, $n_{\text{н}}$ и $n_{\text{н.т}}$ коэффициенты трансформации соответственно трансформаторов тока, трансформаторов напряжения схем звезда—звезда и звезда—разомкнутый треугольник.

Если отброс контактов может вызвать ложное действие защиты, следует проверить работу реле при подаче и сбросе обратной (в сторону размыкания контактов) мощности. Для этого на реле подают обратную мощность, изменяя ее в пределах от $10S_{\text{ср}}$ до максимально возможного значения при КЗ на шинах подстанции, а затем сбрасывают ее одновременным отключением тока и напряжения. При этом не должно быть сильного отбрасывания подвижной системы от упора, которое могло бы вызвать замыкание подвижного контакта с неподвижным. Отброс уменьшают дополнительной затяжкой пружины, увеличением межконтактного расстояния, а если замыкание контактов устранить не удастся, то в действие защиты вводят необходимое замедление.

3.2.3. Фильтр-реле тока и напряжения обратной последовательности.

Фильтр-реле тока. Прежде всего надо проверить заводские уставки реле при имитации двухфазных и однофазных замыканий. Значения тока срабаты-

вания исполнительного реле, измеренные на входе фильтра при данном виде КЗ, должны совпадать с точностью до 3—5 %, а отношение средних (из трех измерений) значений тока срабатывания в режимах однофазного и двухфазного КЗ должно быть близко к $\sqrt{3}$.

Проверку ведут в следующем порядке. Закорачивают выходные зажимы реле и на двух крайних (при новом включении) или на рабочих (при повторной проверке) уставках по шкале измеряют ток срабатывания исполнительных реле, подключая поочередно фазы А—В, В—С и С—А. Измеренные значения тока должны быть в $\sqrt{3}$ раз больше уставки на шкале, так как реле градуируется по фазному току обратной последовательности. Коэффициент возврата реле должен быть не менее 0,75. Измеряется также напряжение на выходе нагруженного фильтра при токах срабатывания на рабочей уставке, а у реле РТФ1, кроме того, падение напряжения на резисторах R1 и R2 (раздел 3, рис. 43). Для всех измерений напряжения на вторичной стороне трансформатора и трансреактора требуется вольтметр с пределами измерения 3—6 В (для реле РТФ1 на номинальный ток 1 и 5 А и РТ2 на 5 А) и 15—30 В (реле РТ2 на 1 А).

Для оценки линейности фильтра определяется возможное значение напряжения на выходе фильтра при расчетной кратности тока трехфазного КЗ. Если это значение неизвестно, измерения производят при 10-кратном номинальном токе. Порядок подачи тока тот же, что и при проверке тока срабатывания. Разность напряжений при любых двух измерениях из трех не должна превосходить напряжения на выходе фильтра при токе срабатывания реле. Это испытание целесообразно совместить с проверкой на вибрацию контактов электромеханического исполнительного органа после его испытания.

Настройка фильтра (в случае необходимости) сводится к регулировке сопротивлений переменных резисторов. В одну из обмоток трансформатора тока и одну — трансреактора, включенных встречно, подают синусоидальный ток двойного номинального значения и при отключенной цепи выпрямительного моста измеряют падение напряжения на резисторах R1, R2 и напряжение на выходе фильтра. Нормально значения всех трех напряжений должны быть равны между собой. В противном случае приступают к настройке, начиная ее с изменения сопротивления резистора R2; затем измеряют выходное напряжение, изменяют, если потребуется, сопротивление R1 и т. д. до тех пор, пока разница между указанными значениями напряжения не уменьшится до 2—3 %. Судить о настройке фильтра можно и по значениям углов: угол между первичным током и напряжением на резисторе R2 должен быть равен 60° , а угол между напряжениями на резисторах R1 и R2— 120° ; подстройка — как в предыдущем варианте.

После этого следует повторить измерения при обтекании током двух других фаз трансформатора тока и трансреактора. Расхождение в результатах измерений, выполненных одним и тем же прибором, не должно превышать 5 %. В заключение вновь сравнивают токи срабатывания реле при имитации КЗ.

Когда настроить фильтр указанными способами не удастся, проверяют отдельные элементы фильтра. Измеряется сопротивление постоянному току вторичных обмоток трансформатора тока и трансреактора, снимаются их вольт-амперные характеристики (ВАХ трансреактора должна быть линейной),

проверяется коэффициент трансформации трансформатора тока, а у трансформатора, кроме того, измеряется сопротивление взаимной индукции при обтекании током одной из его первичных обмоток.

Фильтр-реле напряжения РНФ1М. Настройку фильтра проверяют имитацией двухфазных коротких замыканий, подавая напряжение на каждую пару входных зажимов фильтра и закорачивая переключателем один из них с третьим, оставшимся свободным. Выходное напряжение, измеренное в точках N—M (раздел 3, рис. 40) при каждом из таких опытов, не должно отличаться от среднего более чем на 2—3 %. При больших отклонениях фильтр регулируют.

С этой целью подают входное напряжение, равное 100 В, и при отсоединенной нагрузке измеряют напряжение на всех элементах схемы и на ее выходе. Напряжения на элементах каждого плеча должны быть 86,5 и 50,0 В (отношение $\sqrt{3}$), а напряжение на выходе — $\sqrt{3}/2$ от входного, т. е. 86,5 В. Регулировкой резисторов добиваются достижения указанных значений с точностью до 1 %.

Поднимая напряжение на входе фильтра от нуля до напряжения срабатывания выходного реле, измеряют его значение $U_{ср}$. Линейное напряжение срабатывания реле будет $U_{2лин} = U_{ср}/\sqrt{3}$. Уставки по линейному напряжению обратной последовательности можно изменять от 6 до 12 В, отклонение значения $U_{ср}$ от уставки допускается не более 8 %. Коэффициент возврата должен быть не менее 0,75. Отсутствие вибрации контактов проверяют при подаче на вход фильтра напряжения от $1,05U_{ср}$ до 120—130 В.

3.3. Статические реле

3.3.1. Проверка радиоэлектронных компонентов. При поиске неисправностей в схемах статических реле, а также при выборе элементов испытательных схем возникает необходимость проверки отдельных компонентов.

Резисторы и конденсаторы. Прежде всего следует убедиться в отсутствии внешних повреждений и в соответствии параметров, обозначенных на корпусе, тем, которые требуются для данной схемы согласно спецификации или предварительному расчету, выбору по каталогу.

При осмотре резистора обращают внимание на целостность корпуса, лакового покрытия, выводов проводникового элемента. Сопротивление резистора измеряют омметром или мегаомметром. Перемещение движка переменных резисторов должно быть плавным, без заеданий, плавно и монотонно должно изменяться и сопротивление этих резисторов.

Особо следует обратить внимание на выбор резистора по мощности, имея в виду, что обозначенное на его корпусе номинальное значение мощности является предельным значением длительно допустимой рассеиваемой мощности, при котором температура резистора может достигать 300 °С. Чтобы не подвергать перегреву другие компоненты схемы и продлить срок службы резистора, его выбирают так, чтобы в длительном режиме рассеиваемая мощность была существенно меньше номинальной. Вместе с тем полезно иметь в виду и то обстоятельство, что в режиме кратковременной или повторно-кратковременной нагрузки резистор может пропускать значительно больший ток,

чем номинальный. Если через резистор сопротивлением R проходит ток I , то рассеиваемая мощность будет $P = I^2R$, а при подключении резистора на напряжение U она рассчитывается как $P = U^2/R$.

Конденсаторы. Когда возникает сомнение в исправности конденсатора, его проверяют на пробой и короткое замыкание путем измерения сопротивления между выводами и между выводами и металлическим корпусом. Пробой, не выявленный на низком напряжении источника питания омметра, может обнаружиться при проверке изоляции между теми же выводами с помощью мегаомметра.

Параметры конденсаторов с твердым диэлектриком сохраняются длительное время, электролитические же конденсаторы подвержены старению, которое сопровождается высыханием электролита и потерей емкости. Ориентировочно о емкости конденсатора можно судить по характеру изменения тока, подаваемого толчком от источника постоянного тока, например, от батарейки: у исправного конденсатора вначале наблюдается бросок тока, затем — постепенное его уменьшение почти до нуля.

Измерить емкость конденсатора с необходимой точностью можно соответствующими приборами или методом амперметра—вольтметра на переменном (синусоидальном) токе: $C = 10^6 I / \omega U$, где C — емкость конденсатора, мкФ; I — ток через конденсатор, А; U — напряжение на нем, В; ω — угловая частота; $\omega = 314$ 1/с при частоте источника питания $f = 50$ Гц. Для улучшения формы тока и ограничения его значения рекомендуется включать в цепь конденсатора резистор, сопротивление которого равно примерно 10 % емкостного сопротивления конденсатора.

Электролитические конденсаторы устанавливаются, как правило, в цепях постоянного или выпрямленного тока, и обычно выводы конденсатора подключаются к положительному полюсу цепи, а металлический корпус — к отрицательному (общей точке цепи, к металлическому корпусу устройства). У конденсаторов иной конструкции полярность выводов должна быть обозначена.

Диоды и транзисторы. Все полупроводниковые приборы очень чувствительны к температуре, поэтому определять их параметры следует с учетом этого обстоятельства, желательно при комнатной температуре. Монтаж выполняется таким образом, чтобы эти приборы располагались вдали от источников тепла. При пайке или лужении выводов рекомендуется применять припой с низкой температурой плавления, пользоваться маломощным паяльником и касаться им вывода прибора на время не более 2—3 с на расстоянии не менее 3—5 мм от корпуса.

Рабочие значения тока, напряжения, мощности должны быть существенно ниже предельных. При снижении тока и напряжения до 70 % предельного надежность полупроводниковых приборов возрастает в десятки раз.

Следует учитывать также форму кривой тока и характер нагрузки. Приводимые в справочниках средние значения токов выпрямительных диодов соответствуют их работе на активную нагрузку, при угле проводимости 180 град. эл. В этом случае амплитудное значение тока в 3,14 раза, а действующее в 1,57 раза превышает его среднее значение. При работе диодов в выпрямителях на активно-емкостную нагрузку эти отношения могут быть гораз-

до больше, в зависимости от коэффициента пульсации на выходе выпрямителя. Так, при коэффициенте пульсации 0,1 % амплитудное значение тока может достигать 15, а действующее — 3,5 среднего значения. Поэтому для данных схем рекомендуется снижать рабочий ток через каждый диод не менее чем в 2,2 раза против максимально допустимого среднего значения по справочнику.

При последовательном включении диодов обратное напряжение на каждом из них должно быть примерно одинаковым. Но так как обратное напряжение на диоде в такой цепи определяется падением напряжения на его обратном сопротивлении, значение которого у различных вентилях может отличаться в несколько раз, обратное напряжение на одном или нескольких вентилях может превысить допустимое значение. Для выравнивания обратного напряжения на последовательно соединенных вентилях их шунтируют резисторами, сопротивление которых должно быть в 3—5 раз меньше обратного сопротивления диодов.

При параллельном включении диодов принимают меры к равномерному распределению тока между ними. В противном случае токи в параллельных ветвях распределятся обратно пропорционально прямому сопротивлению диода и могут превысить максимально допустимое значение. Для выравнивания токов последовательно с вентилями вводят резисторы, сопротивление которых должно быть по крайней мере втрое больше прямого сопротивления диодов.

Разумеется, для обеих схем вентиля подбираются одного типа и с близкими значениями параметров: при последовательном соединении — с одним и тем же номинальным обратным напряжением (одного класса), при параллельном — с тем же или близким значением прямого падения напряжения (одной группы).

Общую оценку работоспособности диода можно произвести с помощью омметра: у исправного прибора прямое сопротивление на несколько порядков меньше обратного. Показания омметра «0» или «∞» указывают первое — на пробой, второе — на обрыв выводов или разрушение полупроводниковой структуры диода. Надо только выбирать предел измерения омметра так, чтобы измерительный ток не превысил допустимого для данного диода значения.

Общую оценку пригодности транзистора также можно произвести с помощью омметра. Прямое сопротивление перехода эмиттер—коллектор составляет обычно у транзисторов малой мощности 50—100 Ом, средней и большой — 10—30 Ом. Обратное сопротивление перехода должно быть у транзисторов малой мощности порядка десятков и сотен килоом, средней и большой мощности — свыше 1 кОм.

Более полное суждение о качестве транзистора можно получить путем измерения его основных параметров (рис. 43). *Обратным током* коллекторного перехода $I_{к.о}$ называют ток, протекающий через переход коллектор—база при отключенном эмиттере и заданном обратном напряжении $U_{обр}$ между коллектором и базой. Измерение тока $I_{к.о}$ выполняют по схеме рис. 43а. Сопротивление резистора в цепи базы, защищающего схему от коротких замыканий, выбирают по выражению

$$R \approx 0,1U_{обр}/I_{к.о}.$$

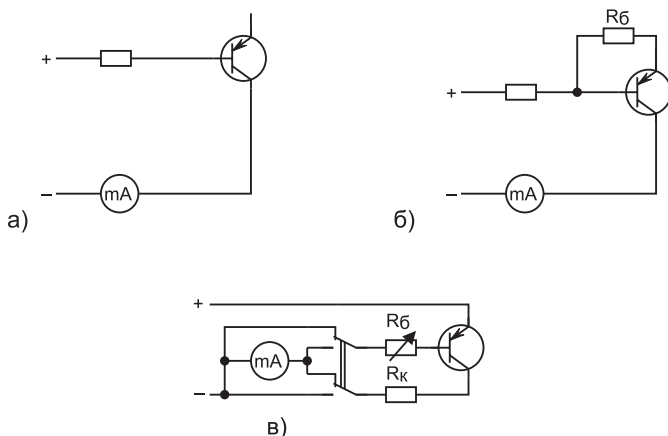


Рис. 43. Схемы измерения параметров транзистора: а — обратного тока коллекторного перехода; б — начального тока коллектора; в — коэффициента усиления по току

Начальный ток коллектора $I_{к.н}$ — это ток в цепи коллектора при замкнутой цепи эмиттер—база и заданном напряжении на коллекторе. Измерение тока $I_{к.н}$ выполняют по схеме рис. 43б. Сопротивление резистора R_6 в базовой цепи составляет 500—1000 Ом для маломощных транзисторов, для мощных — до 2 Ом. Токоограничивающее сопротивление рассчитывают по формуле

$$R \approx U_{обр}/I_{к.н}.$$

Значения напряжения питания в схемах 43а и 43б оговариваются в паспортных данных транзистора.

Коэффициент усиления по току определяется по схеме рис. 43в. В одном из положений переключателя устанавливают ток базы $I_{б1}$, в другом — измеряют соответствующий ему ток коллектора $I_{к1}$. Далее устанавливают ток базы $I_{б2} = (1,3—1,5)I_{к1}$ и измеряют ток $I_{к2}$. Коэффициент усиления рассчитывают как

$$b \approx (I_{к2} - I_{к1})/(I_{б2} - I_{б1}).$$

Приближенный характер расчета обусловлен нелинейностью зависимости $I_к(I_б)$.

Логические схемы. Интегральные микросхемы. Проверить отдельные элементы этих схем невозможно, достаточно лишь убедиться в работоспособности схемы. Для этого необходимо подать на вход схемы нормированный сигнал и наблюдать за ее реакцией. При этом удобно пользоваться портативными логическими устройствами типа логического пробника, разработанными собственными силами либо выпускаемыми промышленностью. Ряд моделей таких пробников был разработан организациями ГПИ Тяжпромэлектропроект.

Одна из них (П-1) предназначена для индикации состояния транзисторно-транзисторных логических элементов (микросхем серии К155 и т. п.). Информация об уровне сигнала получается при касании иглы пробника проверяемой точки схемы. Уровню «логическая 1» соответствует свечение индикатора, «логический 0» — отсутствие свечения, а неопределенный уровень

сигнала индицируется цветом свечения. Особенностью пробника является устройство для растяжения импульсов, позволяющее индицировать узкие одиночные импульсы длительностью не менее 50 нс или серии импульсов частотой до 10 МГц.

Модель ИЛС-4 предназначена для испытания логических элементов серии «Логика Т». Число команд — 11, из них 10 потенциальных и одна импульсная с регулируемой длительностью от 2 до 20 мс. Число контролируемых сигналов — 12, из них 2 с запоминанием.

Разнообразные логические пробники, удобные для выполнения наладочных работ, предлагаются иными фирмами. Так, фирма Conrad Electronic выпускает портативный (масса 50 г) логический тестер MOD 625 для проверки элементов ТТЛ- и КМОП-логики. Тестер имеет встроенный жидкокристаллический индикатор импульсов и мультивибратор. Входное сопротивление 120 кОм, максимальная частота 50 МГц, минимальная необходимая длительность импульса 10 нс. Генератор 0,5/400 Гц, с переключением. Сопротивление входа синхронизации 1 МОм.

Проверку сложных бесконтактных схем на функционирование производят поэтапно. На первом этапе проверяются элементарные составные части (модули) устройства: ячейки, субблоки, блоки. Для этой цели используются тестеры или специальные устройства, поставляемые изготовителем. На втором этапе проверяется функционирование более сложных узлов, например, комплектных устройств. Эти операции осуществляются с помощью специализированных имитаторов, вырабатывающих определенный набор сигналов для воспроизведения реальных режимов работы узла. Для программируемых систем предусматриваются тестовые программы проверки. На заключительном этапе проводится проверка работы устройства в рабочем режиме.

При обнаружении неисправного элемента или узла следует сразу же заметить его на исправный, а затем по возможности выявить конкретный дефект неисправного модуля. Большинство дефектов бывает связано с ошибками внутриблочного монтажа, некачественным монтажом и пайкой печатных плат, повреждением печатных проводников. Вышедшие из строя диоды, транзисторы, микросхемы подлежат замене.

Возможны также неисправности, связанные с временем распространения сигналов. Если время прохождения логических сигналов от входа к выходу по нескольким независимым путям оказывается примерно одинаковым, то возникают так называемые «гонки» сигналов и неопределенные комбинации их, что приводит к появлению ложных сигналов на выходе. Для отыскания причин таких дефектов проверяют параметры сигналов по всему тракту их прохождения от входа к выходу. Эти работы производятся с помощью осциллографа и специальной аппаратуры, они достаточно трудоемки и сложны.

Ввиду того, что микросхемы и узлы автоматики на их основе имеют высокое входное сопротивление и малое потребление, они подвержены влиянию электромагнитных помех. Различают помехи внутреннего происхождения или внешнего. Источниками внешних электромагнитных помех могут быть тиристорные преобразователи, электродвигатели, коммутационные аппараты. Внутренние помехи могут быть обусловлены особенностями элементной базы, паразитными связями, взаимным влиянием отдельных узлов

через источники питания и др. Хотя основные мероприятия по обеспечению помехоустойчивости стремятся осуществить еще на стадии проектирования, а затем и монтажа, полностью устранить влияние помех удастся при этом не всегда.

Статической называют помеху, время воздействия которой на данный логический элемент значительно превышает время его переключения, *динамической* — такую помеху, длительность которой соизмерима со временем переключения. В общем случае допускается наличие помехи, значение которой заведомо недостаточно для переключения логической схемы. Для схем серии К155, например, максимально допустимое напряжение статической помехи на входе принимают равным 0,4 В.

Импульсные (динамические) помехи могут вызываться следующими факторами: отражениями в линиях связи от их неоднородностей или несогласованных нагрузок; перекрестными наводками между линиями связи; паразитными связями между микросхемами по цепям питания и заземления; искажением формы сигнала; «гонкой» сигналов; наводкой от внешних электромагнитных полей. *Перекрестными* называются помехи, вызванные взаимодействием соседних сигнальных линий. Для уменьшения таких помех необходимо располагать проводники возможно ближе к проводящей поверхности, увеличивать расстояние между проводниками или применять витые пары. Линия в виде витой пары имеет фиксированное волновое сопротивление, не зависящее от расстояния до проводящей поверхности, что облегчает *согласование* линии связи как с источником, так и с приемником сигнала.

Сигналы передаются по данной линии связи без искажения лишь при отсутствии отраженных волн от конца линии. Для этого сопротивление приемника должно быть равно волновому сопротивлению линии, т. е., как говорят, приемник и линия должны быть согласованы. Если же это условие не соблюдается, то согласования можно добиться, включив между линией и приемником согласующее устройство, например, трансформатор.

Кроме изложенных, на стадиях монтажа и наладки можно осуществить следующие общие рекомендации по обеспечению помехоустойчивости цифровых и логических устройств. Все металлические части и экраны выводятся на отдельный контакт разъема, который подключают к шине «земля» комплектного устройства, избегая при этом соединения «шлейфом». Не рекомендуется подавать на разъемы блоков сигналы от внешних устройств без промежуточной гальванической развязки.

С целью снижения статических помех напряжение *питания* должно быть стабилизированным и максимально сглаженным. Разводка питания по блокам должна выполняться радиально с применением свитых проводов. Для подавления импульсных помех от источников питания устанавливаются сетевые С-или LC-фильтры. Сетевые трансформаторы должны иметь электростатические экраны между первичной и вторичной обмотками, позволяющие в 10—15 раз снизить паразитную межобмоточную емкость, которая может достигать сотен пикофард.

Внутренние линии связи должны быть возможно короче. Одиночные проводки не следует укладывать в жгут. Несогласованные витые пары допускается укладывать в плоские жгуты и в группы проводов без увязки их в жгуты.

Длинные линии связи выполняются согласованными витыми парами или коаксиальным кабелем. Монтаж линий связи между блоками и переключателями, тумблерами и т. п. выполняется экранированными или одиночными проводами, собранными в жгут с общей экранной оплеткой. Не допускается укладка в один жгут информационных цепей с цепями коммутации и индикации, а также с цепями переменного тока 50 Гц.

Внешние связи. Цепи внешних сигналов получают питание:

- цепи входных сигналов, поступающих от контактных коммутационных аппаратов (кнопок, переключателей и т. п.), — от источников питания внешних устройств соответствующего комплектного устройства;
- цепи выходных сигналов комплектного устройства — от источника питания внешних устройств этого комплектного устройства.

Внешняя информация может быть подразделена на три группы:

- команды, поступающие от контактных или бесконтактных аппаратов;
- информация в виде параллельного кода;
- последовательность импульсов.

Сигналы первой группы рекомендуется передавать кабелями связи, имеющими парную скрутку проводов. Сигналы второй группы могут передаваться по кабелям связи с общим экраном, поверх которого наложена изоляция, а сигналы третьей — с помощью коаксиальных кабелей. При передаче цифровых и импульсных сигналов с частотой более 10 кГц целесообразно применение одно- и многополюсных коаксиальных кабелей.

В промышленных установках с преобладанием низкочастотных полей (50—1200 Гц) целесообразно применение стального экрана в качестве основного, дополнительное же применение медного экрана оправдано лишь при воздействии высокочастотных (свыше 10 кГц) электромагнитных полей. При передаче низкочастотных сигналов, в том числе и аналоговых, могут использоваться двухполюсные и многополюсные кабели и провода связи.

3.3.2. Промежуточные реле и реле времени.

Сопrotивление изоляции реле с электронными компонентами измеряют мегаомметром на 500 В; оно должно быть не ниже 50 МОм. Предварительно следует проверить отсутствие замыканий на землю в схеме реле посредством омметра, ЭДС источника питания которого не превышает 15 В. При испытании изоляции повышенным напряжением цепи с электронными элементами должны быть отключены.

Проверяется работа реле при пониженном до 80 % и повышенном до 110 % номинального значения напряжения. Реле времени проверяют на рабочей уставке, а также и на других, если они заданы.

Обнаружить неисправности в схеме можно путем сравнения проверяемого реле с заведомо исправным. Для этого оба реле подключают к одному источнику питания и подводят к ним напряжение (ток) в пределах 0,5—1,5 уставки. Далее измеряют напряжение в одинаковых точках схемы обоих реле и сравнивают полученные результаты.

При замыканиях на землю в цепях оперативного постоянного тока возможно ложное срабатывание высокоомных промежуточных реле (РП16, РП18 и др.), которые к тому же могут самоудерживаться через сопротивление контроля изоляции. Для предотвращения этих явлений необходимо настроить

реле на напряжение срабатывания 0,6—0,7 номинального. В тех случаях, когда ложное срабатывание реле может привести в действие коммутационные аппараты или устройства противоаварийной автоматики, искусственно снижают сопротивление цепи обмотки, шунтируя ее резисторами. Номинальная рассеиваемая мощность этих резисторов должна быть порядка 15—20 Вт, сопротивление 5,1 кОм для сети оперативного тока 220 В и 1,2 кОм для сети 110 В. В общем случае сопротивление шунтирующего резистора выбирается таким, чтобы результирующее сопротивление было не более 4 кОм при 220 В и не более 1 кОм при 110 В. Ввиду значительного тепловыделения эти резисторы должны монтироваться вне корпуса реле.

3.3.3. Реле тока и напряжения.

К реле подводится оперативное напряжение (регулируемое), на вход подается контролируемая величина (напряжение или ток), значение которой регулируется автотрансформатором или потенциометром. Измерительные приборы в контролируемых цепях должны иметь класс точности 0,5. С помощью кнопочных переключателей на шкале набирается сумма чисел, соответствующая заданной уставке:

$$N = (A_{уст}/A_{мин}) - 1,$$

где $A_{уст}$ и $A_{мин}$ — соответственно заданная и минимальная уставки по току (реле РСТ11—РСТ14) или по напряжению (реле РСН14—РСН17);

$$N = U_{уст} - 180 \text{ (реле РСН12, РСН18).}$$

Уставка реле контроля изоляции выставляется непосредственно в единицах измерения (U РСН11 — в вольтах).

Вначале измеряют ток или напряжение срабатывания реле и определяют коэффициент возврата, который должен быть не ниже 0,9 для максимальных реле и не выше 1,1 для реле минимального напряжения, если не нормируются иные значения. Проверяется работа реле при пониженном на 20 % напряжении оперативного тока. Далее 3—4 раза включают реле при повышенных значениях контролируемой величины: токовые реле при 10-кратном токе уставки, реле напряжения — при 110 % номинального напряжения. Если после этих испытаний параметры срабатывания не изменились, реле считают исправным. У биполярных реле РСН11 расхождение значений напряжения срабатывания при прямой и обратной полярности не должно превышать 10 %.

В случае неисправности реле следует найти и заменить поврежденный элемент. Когда при визуальном осмотре обнаружить его не удастся, проверяют напряжение в контрольных точках и сравнивают результаты с заводскими данными. Для разных экземпляров реле расхождение может составлять 10—15 %; измерения производят с помощью электронных и цифровых вольтметров, осциллографов.

У реле РСТ11-14 и РСН14-17 напряжение измеряется относительно нулевого потенциала схемы. В первой контрольной точке ХР1 измеряется напряжение на выходе компаратора — постоянное до срабатывания реле и периодическое, с импульсами прямоугольной формы, после его срабатывания. Во

второй контрольной точке ХР2 измеряется напряжение, которое управляет компаратором и имеет небольшое отрицательное значение, в третьей — напряжение выхода компаратора, положительное или отрицательное.

В схеме реле РСН11 на первой контрольной точке измеряется напряжение выхода компаратора, на второй и третьей — положительное и отрицательное оперативное напряжение, на четвертой разность между нестабилизированным (48 В) и стабилизированным (15 В) выпрямленным напряжением. Измерения производятся относительно точки «—» контролируемого напряжения.

В схемах реле РСН12, РСН18 оперативное напряжение измеряется на первой контрольной точке, выходное напряжение компаратора — на второй и напряжение цепи управления исполнительным электромагнитным реле — на третьей.

Напряжение срабатывания электромагнитного реле должно быть не более 27 В для реле РСН11 и 66 В для реле серий РСТ11-14, РСН14—РСН17, РСН12, РСН18.

3.3.4. Реле тока дифференциальное (РСТ15).

После проверки реле на функционирование настраивают его на рабочей уставке в следующем порядке. Подают оперативное напряжение 220 В постоянного тока на зажимы питания схемы и регулируемое переменное напряжение от внешнего источника — на входные зажимы трансреактора. Плавно увеличивая входной ток, фиксируют срабатывание реле и определяют основную относительную погрешность по формуле

$$\delta I = \frac{I_{\text{ср}} - I_{\text{ср.расч}}}{I} \cdot 100 \%,$$

где $I_{\text{ср}}$ — среднее из результатов трех измерений тока срабатывания на выбранной уставке; $I_{\text{ср.расч}}$ — расчетное значение тока срабатывания.

При получении погрешности $\delta I > 10 \%$ или в случае отказа реле проверяют его электрическую схему. Убедившись в наличии оперативного напряжения, выставляют минимальные уставки срабатывания. Наблюдают форму кривой напряжения в контрольных точках, измеряют его при отсутствии входного тока и при номинальном токе и сравнивают полученные значения с имеющимися в заводских инструкциях, протоколах аналогичных испытаний и других документах.

При необходимости проверяют частотную характеристику фильтра и задержку на срабатывание. Для снятия частотной характеристики вход фильтра подключают к регулируемому источнику синусоидального напряжения и, изменяя частоту от нуля до двойной номинальной, при входном напряжении $U_{\text{вх}} = 1-2 \text{ В}$, измеряют напряжение $U_{\text{вых}}$ на выходе фильтра и вычисляют отношение $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$. Выдержка времени определяется сначала совместно для элемента задержки и выходного реле, затем измеряют собственное время срабатывания последнего, подав «минус» напряжения питания непосредственно на его обмотку. Само это реле проверяется только в случае отказа в работе и при условии исправности схемы от ее входа до выхода компаратора. Изменяя напряжение на реле, определяют напряжение срабатывания, которое не должно превышать 60 В. В случае неисправности печатной платы ее следует заменить.

3.3.5. Реле напряжения обратной последовательности (РСН13).

Испытание проводят с помощью источника регулируемого трехфазного напряжения, которое получают либо от комплектной установки, фазорегулятора, трехфазного автотрансформатора, либо собирают схему из реостатов или однофазных автотрансформаторов. В сети 3×220 В два автотрансформатора соединяют по схеме неполной звезды, в сети 3×380 В применяют понижающие трансформаторы 380/220 В или соединяют три ЛАТРа звездой.

С помощью кнопочных переключателей задают требуемую уставку по напряжению обратной последовательности так, чтобы сумма чисел на шкале реле была равна

$$N = U_{\text{уст}} - U_{\text{мин}}$$

где $U_{\text{уст}}$ — заданное линейное напряжение уставки; $U_{\text{мин}} = 6$ В — напряжение минимальной уставки.

Линейное напряжение переменного тока поочередно подводят к двум входным зажимам реле, а третий соединяют с одним из них, имитируя тем самым двухфазное короткое замыкание. Составляющая линейного напряжения обратной последовательности будет при этом в $\sqrt{3}$ раз меньше напряжения, подводимого к реле. Измеряют напряжение срабатывания и возврата реле при всех трех сочетаниях замкнувшихся фаз. Если измеренные значения напряжения срабатывания соответствуют уставке, а разница между ними не превышает 2 %, реле считается исправным.

На реле подается симметричная система линейных напряжений 100 В прямой последовательности, причем асимметрия не должна превышать 1 В. Совместной регулировкой резисторов в плечах входного фильтра сводят к минимуму напряжение небаланса. При правильно настроенном фильтре напряжение на его выходе обычно не превышает 1 В.

Для проверки реагирующего органа следует поменять подключение к реле любых двух фаз и постепенно повышать переменное напряжение до срабатывания реле. Если при этом линейные напряжения срабатывания отличаются от уставки более, чем это допускается техническими условиями, то настройку реле корректируют посредством регулируемого резистора на входе компаратора. Потенциалы в контрольных точках должны соответствовать заводским данным.

Исполнительный орган проверяют в случае, когда при наличии асимметрии реле не срабатывает, в то время как фильтр и реагирующий орган исправны. Напряжение срабатывания электромеханического выходного реле не должно превышать 60 В.

3.3.6. Реле направления мощности (РСМ13).

Посредством ЛАТРа ко входу реле подводится напряжение 100 В, а с помощью другого ЛАТРа и понижающего трансформатора подается ток. Оперативное напряжение постоянного тока должно регулироваться в пределах 175—245 В. Исходным для реле минимальной мощности является состояние большой нагрузки, когда ток равен номинальному, для реле максимальной мощности — состояние минимальной нагрузки.

Выставляют расчетную уставку, измеряют параметры срабатывания и подсчитывают коэффициент возврата реле при номинальном оперативном напряжении 220 В. Измерения повторяют при пониженном на 20 % (до 176 В) и повышенном на 10 % (до 242 В) от номинального значения оперативного напряжения. При всех переключениях реле дребезг контактов должен отсутствовать. В случае отклонения полученных данных от паспортных производят поэлементную проверку реле.

а) ШИМ. Проверяют работу генератора пилообразного напряжения и широтно-импульсного модулятора по кривым напряжения на входе и выходе ШИМ. В схеме предусмотрены переменные резисторы для балансировки напряжения и изменения глубины модуляции и коэффициента усиления по току. ШИМ управляет амплитудно-импульсным модулятором (АИМ);

б) АИМ представляет собой два разнополярных транзисторных ключа. Предельные значения амплитуды положительных и отрицательных импульсов на выходе АИМ, измеренные на эмиттерах этих транзисторов, должны быть равны. На входе канала напряжения имеется RC-корректор фазы с регулируемым резистором, посредством которого можно влиять на угловую погрешность и угол максимальной чувствительности реле;

в) фильтр низкой частоты. Кривая напряжения на выходе фильтра, которую можно наблюдать на выводе переключателя уставок, должна быть сглаженной;

г) исполнительный орган. Напряжение срабатывания выходного реле не должно превышать 60 В. Измерение производят, изменяя напряжение на входных зажимах оперативного тока и подавая на измерительный вход напряжение больше уставки. Если исправное реле не срабатывает, следует проверить элементы схемы исполнительного органа, особенно полупроводниковые.

3.3.7. Реле контроля напряжения и угла сдвига фаз РСНФ12.

Первичные обмотки трансформаторов напряжения линии и шин соединяют последовательно и на их выводы подают трехфазное напряжение, регулируемое по значению и по углу сдвига фаз посредством потенциометров (реостатов). Регулировка напряжения на первом трансформаторе должна обеспечиваться в пределах от 45 до 110 В, на втором — от 80 до 100 В, а угол между векторами этих напряжений — в пределах $\pm 90^\circ$. Рабочая уставка реле по каналу сравнения фаз напряжения определяется по выражению

$$N = \varphi - \varphi_{\min},$$

где N — сумма чисел на шкале уставок; φ — рабочая уставка, град. эл; $\varphi_{\min} = 4$ — минимальная уставка, град. эл.

Измеренное значение уставки не должно отличаться от расчетного более чем на 10 %, коэффициент возврата не должен быть больше 1,2.

Изменяя входное напряжение, проверяют установленные параметры реле и работу сигнализации каналов напряжения и сравнения фаз. Коэффициент возврата реле по каналу контроля напряжения линии должен быть не более 1,2, по каналу контроля напряжения шин — в пределах 0,85—0,95. Работу схемы тестирования проверяют при угле сдвига фаз, равном нулю.

Если результаты проверки не удовлетворяют требованиям технических документов, следует проверить потенциалы в контрольных точках и убедиться в исправности элементов схемы. Напряжение срабатывания выходных реле должно быть не выше 16 В, напряжение возврата не ниже 2—3 В.

3.4. Микропроцессорные устройства РЗА

Основным отличием методик наладки этих устройств от применяемых при наладке устройств защиты на электромагнитных или полупроводниковых реле является программный ввод параметров срабатывания защиты и логики работы системной автоматики (АВР, АПВ) и сигнализации.

Установка и изменение параметров выполняются с помощью кнопок на передней панели устройства или с внешнего пульта управления, который подключается к разъему на лицевой панели. Первичную настройку уставок защиты удобнее выполнять с выносного пульта, так как он имеет более развитую клавиатуру и ввод параметров существенно упрощается. Вводимые функции и параметры настройки отражаются на буквенно-цифровом индикаторе. С помощью кнопок выполняется перемещение по страницам меню и обеспечивается доступ к желаемым функциям настройки параметров.

В качестве примера ниже рассматривается вкратце настройка устройства защиты на основе микропроцессорного блока типа Seram 2000 производства GROUP SCHNEIDER (Франция).

Наладка устройства начинается с установки используемых входов, определяющих состав защиты присоединения. Установка выполняется изменением положения микровыключателей на монтажной панели, к которой подводят провода от периферийных устройств (трансформаторов тока и напряжения, выключателя и пр.). При этом определяют для каждой фазы:

- первичный ток трансформатора тока;
- вторичный ток трансформатора тока (5 или 1 А);
- способ измерения тока $3I_0$ — как сумму фазных токов или с помощью трансформатора тока нулевой последовательности;
- способ контроля фазного напряжения;
- способ контроля напряжения нулевой последовательности $3U_0$ — как суммы фазных напряжений или по схеме разомкнутого треугольника.

Ввод функций осуществляется в соответствии с проектной схемой и картой уставок присоединения. Основное меню для настройки параметров состоит из трех страниц: меню основных параметров; меню защиты; меню параметров эксплуатации и логической схемы управления. В меню основных параметров вводят паспортные данные сети и оборудования:

1) f_n — номинальная частота сети (50 Гц);

2) данные по трансформаторам тока:

- первичный ток;
- число трансформаторов тока;
- номинальный ток присоединения (электродвигателя, силового трансформатора);
- номинальный ток трансформатора нулевой последовательности;

- 3) данные по трансформаторам напряжения:
 - номинальное первичное и вторичное напряжение;
 - количество трансформаторов напряжения;
 - метод измерения $3U_0$;
 - 4) время интегрирования для ваттметров при измерении активной и реактивной энергии;
 - 5) направление энергии и мощности;
 - 6) скорость передачи и адрес пересылки данных по сети.
- При текущей эксплуатации эти данные не меняются.

Настройка параметров защит.

Меню защит позволяет последовательно выбрать все заданные виды защит присоединения и установить вид характеристики и параметры срабатывания функций. Пределы регулирования параметров определяет и показывает меню. Ввод параметров выполняется цифровыми кнопками и перемещением курсора по данным на дисплее.

Настройка схемы управления и сигнализации присоединения. Используемые логические функции должны быть определены в проекте в виде схемных решений и задания параметров (АПВ, АВР). При настройке схемы в меню необходимо определить активность соответствующих входов и выходов схемы. На входы устройства подаются сигналы состояния выключателя и общеподстанционного оборудования, выходные сигналы служат для включения (отключения) выключателя и сигнализации о срабатывании защит или состоянии параметров сети, отличающихся от заданных.

В зависимости от вида присоединения (электродвигатель, силовой трансформатор, питающий фидер) число и вид используемых входов и выходов существенно отличаются. Для наиболее распространенных видов присоединений имеются стандартные карты настройки, позволяющие определить необходимый набор присоединения входов и выходов устройства. Часть временных функций, используемых в большинстве присоединений (время импульса включения-отключения выключателя), установлены при заводской настройке. При необходимости они также могут быть изменены. Сигнализация может быть выполнена с выдачей сигналов в систему сигнализации подстанции на релейной аппаратуре и одновременной передачей аварийных и предупредительных сигналов по сети на компьютер.

Параметры настройки микропроцессорного устройства заносят в «карту регулировки», которая является документом, отражающим результаты настройки системы защиты, управления и сигнализации присоединения.

3.5. Устройства автоматики

3.5.1. Цепи управления, блокировки и сигнализации. Эти цепи испытываются согласно требованиям, предъявляемым ПУЭ (1.8.37, изд. 7-е) ко всем вторичным цепям. Измеряется сопротивление изоляции, производится испытание ее повышенным напряжением. Автоматические выключатели и контакторы проверяются многократными включениями и отключениями при номинальном и пониженном до 90 % (включение) и до 80 % номинального (от-

ключение) напряжении оперативного тока (не менее 5 раз). Полностью собранные схемы проверяются на функционирование при номинальном и пониженном значениях напряжения оперативного тока, % номинального:

схемы защиты и сигнализации — 80;

схемы управления:

на включение — 90;

на отключение — 80.

Схемы на бесконтактных логических элементах испытываются на функционирование при пониженном до 85 и повышенном до 110 % напряжении оперативного тока путем изменения напряжения на входе в блок питания.

Кроме того, имеет свою специфику наладка схем различного назначения. При проверке схем управления приводами коммутационных аппаратов необходимо обратить внимание на состояние блокировочных контактов в цепях отключающих и включающих катушек и на правильность их регулировки. Блок-контакты не могут точно повторять положение главных контактов выключателя. Поворот подвижного контакта КСА начинается несколько позже и заканчивается несколько раньше, чем поворот вала выключателя. Для того, чтобы выключатель надежно включался, блокировочный контакт в цепи катушки отключения должен замыкаться в конце хода привода на включение, но немного раньше замыкания главных контактов, чтобы обеспечить надежное отключение выключателя при включении его на короткое замыкание. Угол поворота валика КСА должен быть около 90°. Наименьший угол между рычагом на валике и ведущей его тягой должен быть не менее 30°, иначе весь механизм слишком близко подойдет к мертвой точке. Блок-контакт в цепи контактора включения электромагнитного привода должен размыкаться как можно позже, чтобы обеспечить надежность включения, а также разрыва цепи по окончании операции включения.

Регулировка блок-контактов различных типов осуществляется:

- а) изменением длины тяги, управляющей валиком блок-контактов;
- б) перестановкой конца тяги в различные отверстия рычага на валике;
- в) поворотом рычага;
- г) поворотом подвижных контактов на своем валике.

Для увеличения времени замкнутого состояния блок-контактов две или три соседние шайбы подвижных контактов сдвигают между собой по граням вала и включают их параллельно. Для повышения длительно допустимого тока блок-контакты соединяют параллельно, для увеличения разрывной мощности — последовательно. При регулировке необходимо тщательно проверить исправность отдельных элементов контактной системы и надежность передачи к ней от вала переключателя. Регулировка контактов производится при медленном включении выключателя вручную (пружинные и ручные приводы) или домкратом (электромагнитные приводы) и опробуется при нормальном включении и отключении выключателя.

Проверка устройств сигнализации состоит в следующем:

- а) проверка элементов устройств центральной сигнализации (кнопок, ключей, светоиндикаторов и табло, резисторов и др.);
- б) проверка шинок сигнализации и их связей;

в) наладка отдельных схем (мигания, импульсной сигнализации и пр.) и проверка действия их от кнопок, ключей и при имитации сигналов;

г) наладка индивидуальной и групповой сигнализации.

При проверке табло и сигнальных ламп обращается внимание на исправность ламп, правильность выбора цвета свечения (светофильтров), состояние контактов гнезд, четкость и правильность надписей на табло. Проверяются все внешние и внутренние контактные соединения, качество паек, чистота и надежность штепсельных контактов.

Для обеспечения длительного срока службы сигнальных ламп накаливания последовательно с лампой включают ограничительный резистор, сопротивление $R_{ог}$ которого выбирают так, чтобы ток в лампе не достигал номинального значения даже при повышенном напряжении сети, но в то же время свечение лампы оставалось достаточным:

$$R_{ог} = U_{л}(1,25U_{с} - U_{л})/P_{л},$$

где $U_{с}$ и $U_{л}$ — номинальные напряжения сети и лампы; $P_{л}$ — номинальная мощность лампы. Мощность резистора выбирают с таким расчетом, чтобы нагрев его не оказывал заметного влияния на соседние элементы схемы.

При проверке шинки сигнализации следует убедиться в том, что надписи на каждой шинке соответствуют ее назначению, а также в отсутствии связи между разноименными шинками.

Для проверки реле импульсной сигнализации, в частности, РИС-Э2М, на него подают номинальное напряжение и устанавливают ток в первичной цепи импульсного трансформатора равным 30—35 мА. Кратковременно замыкая и размыкая цепь, убеждаются в надежном срабатывании и отпуске реле. Затем, установив предварительно в этой цепи ток 1,5 А, проверяют действие реле при подаче дополнительно импульса тока, значение которого не должно превышать 50 мА. Опробуют работу цепей съема сигнала с центрального пульта и от реле времени. Далее проверяют работу реле при повышенном до 1,15 и пониженном до 0,8 номинального напряжении оперативного тока. Если реле не срабатывает или срабатывает при пусковом токе больше 50 мА, наиболее вероятной причиной могут быть дефекты транзисторов.

Сопротивления резисторов R_N (раздел 3, рис. 71), через которые запускаются реле импульсной сигнализации, выбираются из условий:

Для реле РИС-Э2, РТД11-04, РТД-12:

$$R_N \leq U_{с}/0,2,$$

для реле РИС-Э2М, РТД 11-01:

$$R_N \leq U_{с}/0,05 \text{ (Ом)}.$$

При номинальном напряжении $U_{с} = 220$ В обычно устанавливают сопротивление $R_N = 800...1000$ Ом в первом случае и 3900 Ом — во втором. Соблюдение этих условий обеспечивает допустимый ток соответственно 5 А (прием до 20 сигналов с током до 250 мА каждый) и 1,5 А (прием до 30 сигналов по

50 мА). Уменьшение сопротивлений повышает надежность срабатывания реле, но снижает число принимаемых сигналов из-за насыщения импульсного трансформатора.

Как известно, в сетях с малым током замыкания на землю при неопасных однофазных замыканиях защита действует на сигнализацию. Если в качестве фильтра токов нулевой последовательности в защите используется кабельный насыщающийся трансформатор тока (ТНП), то при проверке монтажа ТНП необходимо иметь в виду следующее.

Провод заземления кабельной воронки должен проходить через окно ТНП и далее подсоединяться к заземляющему устройству (раздел 3, рис. 19); на участке от воронки до места установки ТНП броня кабеля и заземляющий проводник должны быть надежно изолированы от стали ТНП, равно как и броня и воронка — от хомутов или скоб, крепящих кабель к заземленным конструкциям.

Отстройка защиты от токов растекания оценивается по небалансу токов в заземляющем проводнике и броне кабеля. Для этого проводник отсоединяется от заземляющего устройства и между ними включается источник тока. Ток небаланса измеряется во вторичной обмотке ТНП. Когда ток от источника больше тока однофазного замыкания, ток небаланса должен быть в 2—3 раза меньше уставки защиты.

Изоляция сердечника ТНП и крепящих скоб или хомутов относительно брони кабеля испытывается мегаомметром на 2500 В. Снимается характеристика намагничивания трансформатора $U = f(I)$. Проверяется взаимодействие устройства с центральной сигнализацией. Наконец, проверяют устройство сигнализации рабочим током и напряжением, для чего измеряют ток или напряжение непосредственно на входе реле, фиксируя при этом значения первичного тока нагрузки проверяемого присоединения.

Надежность действия электромеханических блокировок определяется, в основном, исправностью блокировочных механизмов (замков, рычагов и т. п.). Нарушение правильной работы механических блокировок обычно вызывается дефектами механизмов или их неправильной регулировкой. В шкафах КРУ, например, деформация установки рычага, открывающего защитные шторки, может привести к тому, что при выкатывании подвижного элемента шторки не закроются. Плохо отрегулированные подвижные контакты заземляющего разъединителя могут не дойти полностью до включенного положения; при разрегулировке механизма элегазовых КРУ могут не пройти команды на операцию В или О.

3.5.2. Устройства АПВ и АВР. Прежде всего надо проверить устройства АПВ и АВР на выполнение основных требований к ним, изложенных в разделе 3, п. 5.4, 5.5.

При проверке комплектных реле АПВ определяется время заряда конденсатора, для чего у реле РП-58, например, подается оперативное напряжение на зажимы 6—7. Время заряда фиксируется по секундомеру от момента подачи напряжения до момента срабатывания промежуточного реле КЛ1 (раздел 3, рис. 72). Последнее не должно срабатывать, если время до замыкания основного контакта реле времени КТ не превышает 22 с, а

если это время достигает 26 с, промежуточное реле должно срабатывать всегда. Время заряда конденсатора до напряжения срабатывания промежуточного реле KL1 можно регулировать изменением нажатия на контактную систему реле. Замыкание основного контакта реле времени должно приводить к срабатыванию реле KL1, если время с момента подачи напряжения, равного 80 % номинального, до момента замыкания основного контакта составит 90 с.

При проверке промежуточного реле определяются токи и напряжения срабатывания, возврата или удерживания по каждой обмотке. В удерживающей обмотке устанавливается ток, равный 80 % номинального, или напряжение, равное 70 % номинального, затем реле вручную устанавливается в положение после срабатывания и проверяется на удерживание в этом положении при обесточенной рабочей обмотке.

У комплектного реле РПВ-258 при включении реле времени КТ1 через 62 с после подачи напряжения замыкание проскальзывающего контакта с выдержкой времени 1 с не должно вызывать срабатывания промежуточного реле KL1, а при включении КТ1 через 86 с замыкание проскальзывающего контакта с уставкой 9 с должно приводить к срабатыванию реле KL1 и КН. Якорь реле KL1 должен удерживаться в притянутом состоянии при протекании через токовую обмотку реле тока, равного 90 % номинального тока удерживания.

Замыкание проскальзывающего контакта КТ1 с уставкой 9 с должно приводить к срабатыванию реле KL1, если реле времени будет запускаться через 180 ± 10 с после подачи 80 % номинального напряжения. Промежуточное реле не должно срабатывать, если время с момента подачи номинального напряжения до момента замыкания конечного контакта реле КТ1 не превышает 63 с, и должно срабатывать во всех случаях, когда указанный промежуток времени достигнет 85 с. Если время с момента подачи 80 % номинального напряжения до момента замыкания конечного контакта реле времени равно 190 с, промежуточное реле также должно сработать.

При испытании уставка проскальзывающего контакта реле времени КТ1 должна быть на 4—6 с больше уставки конечного контакта для того, чтобы промежуточное реле KL1 не сработало от замыкания проскальзывающего контакта. При отключении тока якорь реле KL1 должен возвращаться в исходное положение. После каждого измерения конденсатор С2 необходимо разрядить.

Для обеспечения надежной работы промежуточного реле, токовая обмотка которого включена последовательно с обмоткой электромагнита выключателя, номинальный ток обмотки реле должен быть не менее чем на 20 % ниже тока катушки включения, ток срабатывания реле — на 35 % ниже тока катушки отключения выключателя. Когда обмотки промежуточного и указательного реле соединены последовательно с катушкой электромагнита отключения выключателя, при подаче пониженного оперативного напряжения, равного 80 % номинального, все три аппарата должны четко срабатывать. Если указательное реле отрегулировать не удастся, его следует заменить или включить параллельно обмотке промежуточного реле резистор, чтобы увеличить ток через об-

мотку указательного реле. Выключатели должны быть опробованы в сложных циклах (ВО, ОВ и ОВО).

В схеме АВР следует обратить внимание на отсутствие ложных и обходных цепей во всех возможных вариантах ее работы. Как и для АПВ, проверяются элементы механической передачи к блок-контактам выключателя, их регулировка. Рычажную передачу к КГП необходимо отрегулировать таким образом, чтобы она соответствовала положению пружин независимо от способа натяжения. Проверяются и регулируются уставки реле АВР.

Длительность импульса на включение резервного выключателя должна быть достаточной для его надежного срабатывания, но не чрезмерной. Поэтому выдержка времени на отпускание реле времени, отпадающего при отключении выключателя от защиты, принимается равной времени включения резервного выключателя с запасом примерно 0,5 с, например, 1,1 с для реле типа РП-252 или 1,5–2,0 с для реле серии РЭ-500, РЭВ-800. Необходимо иметь в виду, что время задержки на отпадание этих реле резко уменьшается при понижении оперативного напряжения. В связи с тем, что это обстоятельство может привести к отказу в работе схемы АВР, проверка времени отпадания таких реле должна производиться при напряжении 80 % номинального и является обязательной.

Определяется уставка времени возврата к рабочей схеме питания при возобновлении напряжения на основном источнике питания. Этот переход осуществляется с помощью реле времени, через проскальзывающий контакт которого включается выключатель ввода, а через замыкающий контакт отключается секционный выключатель. Время срабатывания замыкающего контакта устанавливается максимально возможным для данного типа реле (например, 20 с для реле РВ-248), а уставка проскальзывающего контакта должна быть меньше на время, равное времени действия максимальной защиты, с запасом 2,5–3,5 с.

3.5.3. Блоки питания.

3.5.3.1. Блоки питания серии БП11. Блок питания БПТ11.

1. Измеряется сопротивление изоляции цепей относительно корпуса мегаомметром на 1000 В при закороченных диодах и конденсаторе. Сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм.

2. Уставку на ток наступления феррорезонанса принимают меньшей минимального значения тока срабатывания защиты. Выбирают уставку по номинальному напряжению на выходе $U_{\text{вых.н}}$.

3. На выбранных уставках снимают характеристику холостого хода в виде зависимостей входного $U_{\text{вх}}$ и выходного $U_{\text{вых}}$ напряжений от входного тока $I_{\text{вх}}$ при определенном количестве витков w_1 первичной обмотки трансформатора блока (рис. 44а, б); определяют ток наступления феррорезонанса и ток надежной работы блока при холостом ходе.

4. Снимают характеристику $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ при сопротивлении $R_{\text{н}}$ на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки; определяют ток и МДС надежной работы блока (рис. 44в).

5. Опробуют действие защиты первичным или вторичным током.

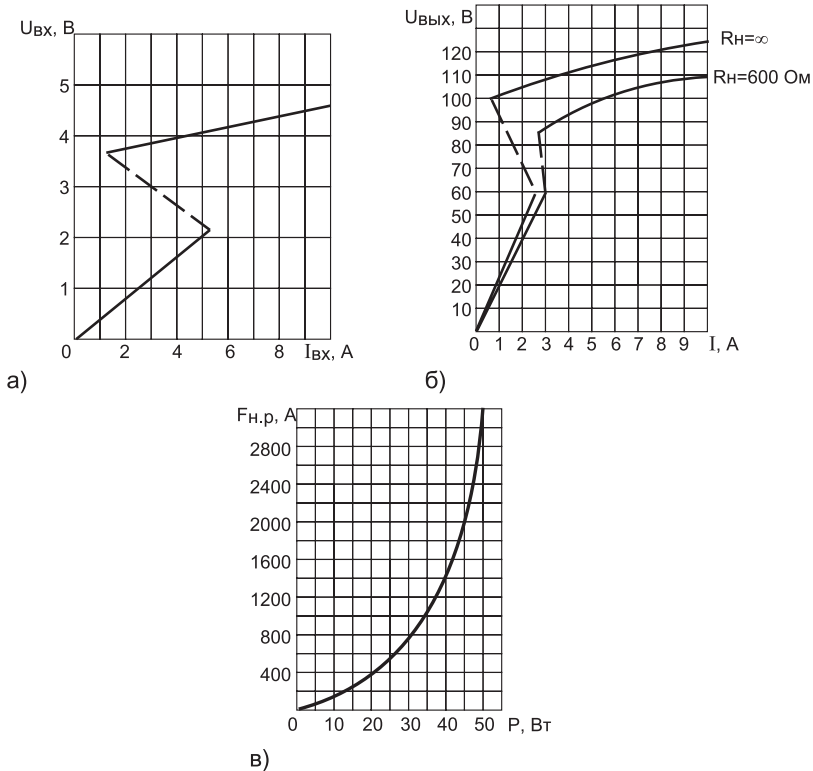


Рис. 44. Характеристики блока БПТ11: а — вольт-амперная характеристика холостого хода ($w_1 = 45$); б — зависимость выходного напряжения от первичного тока ($w_1 = 2 \times 45$ последовательно, $U_{вых.н} = 110 \text{ В}$); в — зависимость МДС надежной работы от мощности нагрузки при $U_{вых} = 0,8U_{вых.н}$ и уставке $U_{вых.н} = 110 \text{ В}$

3.5.3.2. Блок БПН11.

1. Сопротивление изоляции, измеренное мегаомметром на 1000 В, при закороченном выходе блока должно быть не менее 10 МОм.
2. Измеряется выпрямленное напряжение блока при заданных уставках ($U_{вых.н}$ и $U_{вх.н}$) и схеме питания (однофазная или трехфазная).
3. Определяют напряжения надежной работы блока при холостом ходе и максимально возможной (в конкретной схеме защиты) нагрузке; оба значения не должны выходить за пределы нормируемых.
4. Опробуется действие защиты при питании ее оперативных цепей от данного блока.

3.5.3.3. Блоки БПТ1002.

1. При закороченных выходных зажимах измеряют мегаомметром 1000 В сопротивление изоляции: вход—корпус; выход—корпус; вход—выход; оно должно быть не менее 10 МОм.
2. Определяют напряжение выхода при первичном токе 10 А, заданной уставке выходного напряжения и числе витков первичной обмотки $w_1 = 200$. Ток регулируют с помощью реостата, форма тока должна быть синусоидальной;

напряжение выхода при холостом ходе — не более 130 и 260 В для уставок 110 и 220 В соответственно; напряжение выхода должно быть не менее 90 В при уставке 110 В и нагрузке 10 Ом и 180 В при уставке 220 В и нагрузке 40 Ом.

Определяют МДС начала феррорезонанса.

3. Выбирается и устанавливается на блоке число витков w_1 насыщающегося трансформатора в зависимости от коэффициента трансформации и нагрузочной способности трансформатора тока. При питании блока от двух параллельно или последовательно соединенных трансформаторов тока значения напряжения на вольт-амперной характеристике соответственно уменьшаются или увеличиваются.

4. Собирается схема для снятия вольт-амперных характеристик (рис. 45), которая позволяет учесть погрешность трансформаторов тока; при этом токовые цепи должны быть собраны, а первичная обмотка обесточена. Разомкнув рубильник S, снимают зависимости входного $U_{вх}$ и выходного $U_{вых}$ напряжений от входного тока $I_{вх}$ (характеристика холостого хода блока) на рабочих уставках. Определяется ток надежной работы — то минимальное значение тока на входе блока, при котором обеспечивается выходное напряжение $U_{вых} \geq 0,85U_{вых.н.}$

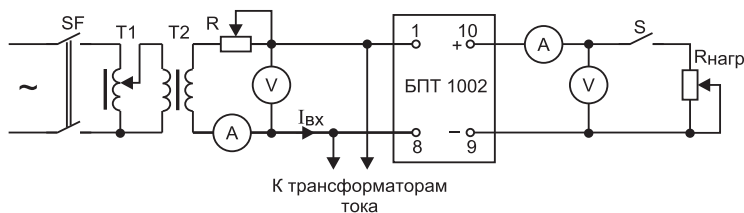


Рис. 45. Схема для снятия характеристик $U_{вх}(I_{вх})$, $U_{вых}(I_{вх})$ и определения тока надежной работы блока БПТ 1002

Характеристику снимают при повышении и снижении напряжения. Если МДС начала феррорезонанса выходит за пределы допустимых значений, ее корректируют изменением числа витков обмотки дросселя или трансформатора, на которые включен конденсатор резонансного контура.

5. Снимается характеристика $U_{вых}(I_{вх})$ при сопротивлении нагрузки на выходе блока, соответствующем максимальной мощности нагрузки в цепях оперативного тока, и определяется ток надежной работы. Примеры отдельных характеристик приведены на рис. 46.

6. Полученные значения тока надежной работы $I_{н.р}$ при холостом ходе и нагрузке блока сравниваются с токами КЗ и уставками защит, для чего вычисляют первичный ток надежной работы блока:

$$I_{н.р} = I_{вх.н.р} n_T / k_{сх},$$

где n_T , $k_{сх}$ — соответственно коэффициент трансформации и коэффициент схемы соединения трансформаторов тока, питающих блок. Принимают $k_{сх} = \sqrt{3}$, когда эти трансформаторы включены на разность токов фаз и когда они работают параллельно с блоками напряжения (БПНС2); во всех остальных случаях $k_{сх} = 1$.

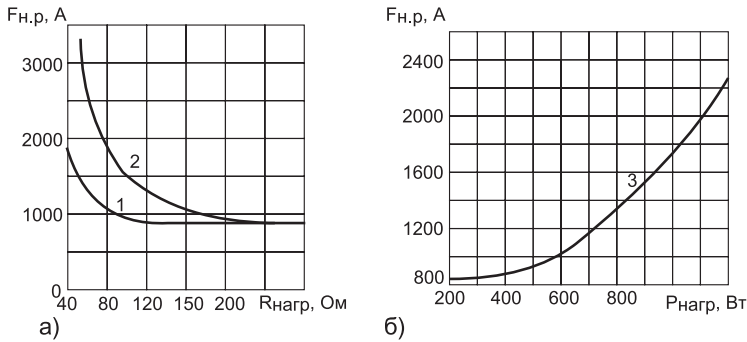


Рис. 46. Зависимость МДС надежной работы блока БПТ1002 от сопротивления для уставки $U_{вых.н} = 220$ В (а) и от мощности нагрузки (б): 1 — $U_{вых} = 0,8U_{вых.н}$; 2 — $U_{вых} = U_{вых.н}$; 3 — $U_{вых} = 0,85 U_{вых.н}$

7. Производят поверочный расчет обеспеченности питания оперативных цепей выпрямленным током. При использовании только блоков БПТ ток $I_{н.р.}$ должен быть меньше, чем ток двухфазного КЗ в минимальном режиме (например, в конце самой длинной отходящей линии) с учетом коэффициента отстройки 1,2 и меньше, чем ток срабатывания защиты в этом режиме. Если оказывается, что указанные условия выполняются с большим запасом, то для облегчения работы трансформаторов тока и самого блока целесообразно уменьшить число витков w_1 трансформатора блока. Рекомендуется, чтобы вольт-амперная характеристика трансформатора тока проходила выше ВАХ блока при токах более 5 А.

Когда используется комбинированный блок питания (с блоками напряжения БПНС2 или БПН1002), расчетным видом повреждения является трехфазное КЗ, при котором напряжение на входе блока напряжения равно нулю, а нагрузка на блок питания максимальна, т. е. КЗ на шинах НН или СН подстанции.

Следует иметь в виду, что в расчетах токов КЗ за трансформатором с РПН необходимо учитывать положение переключателя, так как сопротивления КЗ трансформатора в крайних положениях РПН могут различаться в 1,5—2 раза.

8. Проверяют отключение выключателей от устройств РЗА при питании цепей оперативного тока от блока (блоков), подключенного по постоянной схеме и к постороннему источнику. Желательно выполнить это испытание во время прогрузки первичным током.

9. При токе, близком к номинальному, измеряют входные токи и напряжение на выходе блоков. Затем в первичную цепь кратковременно подают ток, незначительно превышающий расчетное значение тока надежной работы блока, поочередно имитируя междуфазные КЗ. В каждом случае убеждаются в отключении выключателей от контактов защиты при максимальной нагрузке блока. Если мощность нагрузочных устройств недостаточна, ограничиваются испытанием вторичным током по схеме рис. 45.

10. Для снижения волновых перенапряжений в блоке при КЗ в сети следует включить параллельно первичной обмотке трансформатора блока последовательно соединенные конденсатор емкостью 0,5—1 мкФ и резистор сопротивлением 160—230 Ом.

3.5.3.4. Блок БПН1002.

1. Проверяется изоляция — так же, как и для токового блока.
2. На платах блока выставляют уставки первичного и вторичного напряжения.

3. Собирают схему рис. 47: Т1, Т2, Т3 — автотрансформаторы (или потенциалрегулятор) мощностью не менее 1500 В · А на фазу; вольтметр на входе блока поочередно переключается для измерения линейных напряжений. Снимается характеристика холостого хода (рубильник S разомкнут).

Собирают цепь, показанную на рис. 47 штриховыми линиями. При напряжении $U_{вх} = 0,1U_{вх.н}$ включают автомат SF2, измеряют ток КЗ блока и пересчитывают его на номинальное напряжение для проверки чувствительности защиты.

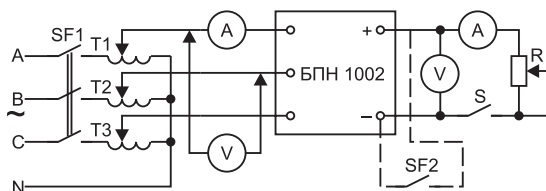


Рис. 47. Схема испытания блока питания БПН1002 (или БПНС2)

При $U_{вх} = U_{вх.н}$ измеряют ток потребления блока и вычисляют значение потребляемой мощности, которое не должно быть более 25 В · А на фазу.

Выходное напряжение блока пропорционально входному напряжению и числу вторичных витков трансформатора блока. При $U_{вх} = 1,1U_{вх.н}$ выходное напряжение должно быть не более 140 или 280 В на уставке 110 или 220 В соответственно.

4. По схеме рис. 47 снимается нагрузочная характеристика блока $U_{вх} = f(R_{нагр})$ при напряжении выхода $U_{вых} = 0,85U_{вых.н}$ и определяется напряжение надежной работы блока.

5. См. выше «Блок БПТ1002», п. 8.

3.5.3.5. Блоки питания стабилизированного напряжения БПНС2.

1. Измеряют сопротивление изоляции, зашунтировав предварительно диоды и конденсаторы.

2. Снимают частотную характеристику фильтра измерительного органа и фильтра в выходной цепи по схеме рис. 48. При напряжении генератора 10—20 В минимум тока через первый фильтр и максимум тока через второй

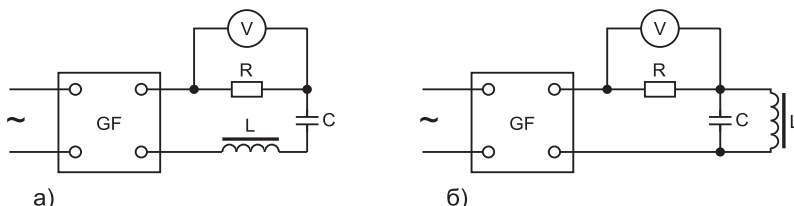


Рис. 48. Схема проверки фильтров второй гармоники:
а — в цепи выхода; б — в цепи управления

должны наступить при частоте 100 ± 5 Гц. Скорректировать резонансную частоту можно изменением воздушного зазора дросселя фильтра. Реле, включенные параллельно элементам фильтра, при измерениях не отсоединяют.

3. Проверка блока в режиме холостого хода (рис. 47). При значении трехфазного напряжения на входе, равном 0,5 номинального, выходное напряжение должно быть в пределах 187—195 В, а при 1,1 номинального — не более 242 В. Регулировку последнего осуществляют изменением глубины отрицательной обратной связи магнитного усилителя.

При трехфазном питании снимают характеристику зависимости тока управления от напряжения на выходе. Положение характеристики относительно осей координат и тем самым значение стабилизированного напряжения на выходе блока устанавливают регулировкой сопротивления резисторов и количества стабилитронов узла стабилизации.

4. Снимают характеристики $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$ по схеме рис. 47 при изменении напряжения входа от 0,5 до 1,1 номинального в режимах холостого хода и нагрузки с $R_{\text{нагр}} = 40$ Ом, контролируя симметрию фазных токов на входе блока. Характеристики должны находиться в зоне допустимых значений. По снятым кривым определяют напряжение надежной работы блока при холостом ходе и сопротивлении нагрузки 40 Ом или при минимальном сопротивлении нагрузки, соответствующем срабатыванию РЗ и отключению выключателей.

Длительная нагрузка блока не должна превышать 1000 Вт, а при отключении выключателей — 2500 Вт.

5. Проверяют пределы изменения напряжения на выходе блока при однофазном питании в режиме холостого хода и с нагрузкой 40 Ом. Напряжение подается на два зажима трехфазного ввода, один из которых соединяют с третьим зажимом. Напряжение на выходе должно оставаться в пределах 187—242 В.

6. Проверяют действие защиты от перегрузок и КЗ. При номинальном трехфазном напряжении на входе блока закорачивают его выходные зажимы «+» и «-» посредством автоматического выключателя (SF2 на рис. 47) и измеряют время отключения блока автоматическим выключателем на входе.

7. Определяют потерю напряжения в проводах, соединяющих источник питания с блоком, как разность между значениями входного напряжения при отключенном и включенном автомате на входе и максимальной нагрузке блока.

8. Проверяют коэффициент пульсаций на выходе сглаживающего фильтра с нагрузкой. При номинальном напряжении на нагрузке 80 Ом коэффициент пульсации должен быть

$$k_n = \frac{U_n}{2U_n} 100 \leq 3 \%,$$

где U_n — размах переменной составляющей напряжения выхода (измеряется с помощью осциллографа); U_n — номинальное напряжение выхода.

9. Проверяют действие защиты (автоматики) при питании ее оперативным током по постоянной схеме от испытуемого блока, на который подают питание от а) постороннего источника и б) от трансформатора напряжения или трансформатора собственных нужд.

10. Измеряют пофазно вторичный ток трансформатора напряжения, нагруженного на блок питания. В случае превышения допустимого значения тока рекомендуется часть нагрузки перенести на трансформатор собственных нужд.

11. Когда блок напряжения, подключенный к источнику на шинах ВН подстанции, используется самостоятельно, без токовых блоков, то для обеспечения питания оперативных цепей выпрямленным током остаточное напряжение при трехфазном КЗ на стороне НН или СН трансформатора в минимальном режиме должно быть больше напряжения надежной работы блока (коэффициент отстройки 1,1).

3.5.3.6. Блоки питания и заряда. Блок БПЗ-401.

1. Сопротивление изоляции между токоведущими частями и корпусом должно быть не менее 10 МОм; измеряется при закороченных диодах, конденсаторах и снятом поляризованном реле.

2. Проверяется реле, контролирующее наличие зарядного напряжения: напряжение срабатывания должно быть не выше 0,7 номинального первичного, коэффициент возврата — не менее 0,25.

3. При номинальном напряжении на входе измеряют выпрямленное напряжение блока в режимах а) холостого хода и б) нагрузки на минимально допустимое сопротивление: 50 Ом при уставке по выходному напряжению 110 В и 200 Ом при уставке 220 В. Выпрямленное напряжение холостого хода должно быть не более 130 и 260 В, а при нагрузке — не менее 95 и 190 В на уставках 110 и 220 В соответственно.

4. Опробуется действие защиты при питании оперативным током от блока.
Блок БПЗ-402.

1. Сопротивление изоляции токоведущих частей — не менее 10 МОм; при измерении выход закорачивается.

2. Количество витков первичной обмотки выбирают путем сравнения вольт-амперных характеристик так же, как и для блока БПТ 1002. Кроме того, необходимо убедиться, что максимальная МДС трансформатора блока не превышает допустимого (по условиям ограничения перенапряжения на первичной обмотке) значения при наибольшем токе КЗ.

3. Снимают характеристики холостого хода $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$ и $U_{\text{вых}} = f(I_{\text{вх}})$ при рабочих уставках по числу витков w_1 и напряжению $U_{\text{вых.н}}$, определяют ток наступления феррорезонанса и ток надежной работы блока. Характеристики снимают при повышении и понижении напряжения. Значение напряжения на выходе при токе $I_{\text{вх}} = 1,25I_{\text{уст}}$ должно соответствовать техническим данным.

4. Снимают характеристику $U_{\text{вх}} = f(I_{\text{вх}})$ при сопротивлении на выходе блока, соответствующем максимальной расчетной мощности нагрузки, и определяют первичный ток надежной работы блока.

5. Опробуют действие защиты при питании оперативных цепей от блока.

3.5.3.7. Блоки конденсаторов.

1. Блоки конденсаторов должны размещаться вблизи привода выключателя или релейной панели. Сопротивление изоляции между жилами кабеля, соединяющего блоки конденсаторов с зарядным устройством и нагрузкой, должно быть не менее 5—7 МОм.

2. Измерение сопротивления изоляции блока конденсаторов относительно корпуса производится мегаомметром на 1000 В при закороченных диодах и конденсаторах, между обкладками конденсаторов — мегаомметром при 500 В. Измерив установившееся значение сопротивления изоляции между обкладками, которое должно составлять не менее 5—10 МОм, разряжают конденсатор на резистор сопротивлением порядка нескольких кОм.

3. Проверяют напряжение заряда конденсаторов и потребление зарядного устройства. Если заряд производится от блоков БПЗ-401 или БПЗ-402, то на вход первого подают номинальное напряжение, а на вход второго — ток $1,25I_{уст}$. После измерения конденсаторы необходимо разрядить.

4. Определяют минимальное значение напряжения или тока на входе зарядного устройства, при котором четко срабатывает реле или электромагнит, питаемый энергией разряда конденсаторов.

5. Проверяют совместную работу блоков конденсаторов и зарядных устройств в схеме РЗА действием на электромагниты выключателя, короткозамыкателя или отделителя.

После каждого испытания конденсаторы блока разряжают.

4. Комплексная проверка РЗА

4.1. Общие испытания и проверка вторичной коммутации

4.1.1. Подготовительные работы. Еще на стадии подготовки наладочных работ на подстанции необходимо:

- ознакомиться с проектом и техническими документами фирм-изготовителей электрооборудования и устройств РЗА;
- произвести поверочный расчет и согласование уставок реле защит;
- подобрать соответствующие заводские инструкции, справочную и техническую литературу, формы протоколов;
- подготовить средства измерений и испытаний, инструменты, приспособления и материалы (аппараты, провода и т. п.), а также средства техники безопасности.

При ознакомлении с проектом следует изучить пояснительную записку, схемы первичной и вторичной коммутации, параметры электрооборудования. Необходимо ознакомиться с размещением высоковольтного оборудования, панелей, щитов управления и сигнализации, источников питания оперативным током, выписать паспортные данные электрооборудования, реле и др. и сопоставить их с проектной спецификацией.

Анализируются принципиальные схемы управления коммутационными аппаратами, РЗА, АПВ, АВР и др. и устанавливается, соответствует ли их выполнение требованиям директивных документов, электроснабжающей организации и владельца подстанции. Работа схем прослеживается по отдельным цепям (защит, управления, блокировок, измерения и сигнализации) и в целом. При обнаружении в принципиальных схемах ошибок, дефектов, несоответствия техническим требованиям должны быть найдены правильные решения, а соответствующие изменения — согласованы с владельцем электроустановки и, если необходимо, с проектной организацией и отражены в исполнительных схемах.

4.1.2. Цепи трансформаторов тока (ТА). В цепях токовых защит обращают особое внимание на правильность соединений обмоток трансформаторов тока, их полярность. Очень серьезные последствия может повлечь за собой обрыв токовых цепей. Контрольные приборы для проверки устройств защит, измерений должны подключаться к токовым цепям через специальные зажимы и испытательные блоки без разрыва цепи тока. При отключении приборов и устройств, установленных в цепях трансформаторов тока, следует предварительно закортить цепи подвода тока, для чего на сборках зажимов должны быть предусмотрены специальные перемычки. Если в условиях эксплуатации высока вероятность нарушения контактных соединений в токовых цепях (на-

пример, из-за вибрации машин и механизмов при установке КРУ, КТП в машинных залах), следует предусмотреть такие меры, как усиление крепления ТА, применение многожильных медных проводов, повышение надежности контактов.

Проверку замкнутого состояния цепей тока можно произвести с помощью омметра. С этой целью прибор включают в рассечку нулевого провода и, поочередно подключая фазные провода, измеряют каждый раз сопротивление между фазным и нулевым проводами. Результаты этих измерений отражают различие между фазами по количеству включенных аппаратов и протяженности цепей, а также выявляют разомкнутые цепи и неисправные контакты.

Испытание под нагрузкой можно выполнить подачей тока во вторичную или первичную цепь от постороннего источника питания. Во вторичную цепь ток подают от однофазного источника GA, подключая его поочередно на каждую пару фаз и фазу с нулем (рис. 49). В первичную цепь ток подают от однофазного или трехфазного источника. При использовании однофазного нагрузочного устройства фазы первичной цепи соединяются временными перемычками так, как это показано на рис. 51.

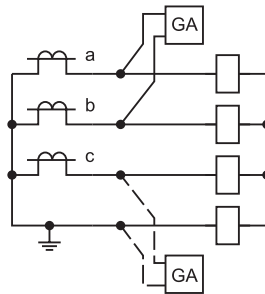


Рис. 49. Проверка вторичных цепей трансформаторов тока прогрузкой однофазным вторичным током

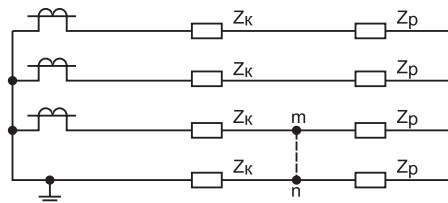


Рис. 50. Проверка целостности нулевого провода вторичных цепей трансформаторов тока

Проверка схем соединения вторичных цепей ТА первичным трехфазным током от постороннего источника, хотя и более трудоемкая, применяется при наладке дифференциальных защит трансформаторов и др. электроприемников большой мощности, так как обеспечивает необходимую уверенность в правильности сборки токовых цепей. С этой целью устанавливают трехфазную закоротку на одной стороне силового трансформатора, за трансформаторами тока, а трехфазное напряжение от нагрузочного устройства достаточной мощности (обычно от сборки 380 В) подают на другую сторону. Предвари-

тельно рассчитывают возможный ток и определяют, на какой стороне трансформатора предпочтительно установить закоротку. Если, в частности, напряжение $3 \times 0,4$ кВ подать на сторону 6—10 кВ понижающего силового трансформатора, то значение испытательного тока на стороне НН будет в пределах 0,5—1 номинального. Измеряют вторичные токи во всех трех фазах и в нулевом проводе.

Обязательным испытанием является проверка схемы соединения вторичных цепей ТА первичным трехфазным током нагрузки. Измеряют вторичные токи во всех трех фазах и нулевом проводе.

Анализируя результаты измерений и векторные диаграммы (если необходимо), составляют заключение о правильности схемы и исправности ТА. Соотношение токов, векторные диаграммы, а также наиболее вероятные ошибки и неисправности при различных схемах токовых цепей приводятся в справочных пособиях.

Когда цепи ТА соединены по схеме «звезда» и нагрузка симметрична, можно проверить целостность нулевого провода измерением тока небаланса в нем. Если проверка производится во время снятия векторных диаграмм прибором типа ВАФ, охватывают клещами прибора нулевой провод, устанавливают режим измерения «фаза» и, вращая лимб, наблюдают за стрелкой индикатора: в случае обрыва нулевого провода стрелка не отклоняется от нуля.

Можно определить целостность нулевого провода и по схеме рис. 50. В этом случае контролируют ток в нулевом проводе, который появляется за счет искусственной асимметрии нагрузки фаз ТА, создаваемой установкой временной перемычки m_n , при условии $Z_k < Z_p$, где Z_k — сопротивление жилы кабеля, Z_p — сопротивление реле. Если это условие не соблюдается, включают последовательно с Z_p резистор сопротивлением 5—10 Ом.

Каждая группа электрически соединенных вторичных обмоток ТА должна быть заземлена только в одной точке: на ближайшей от ТА сборке зажимов или на зажимах самого трансформатора тока. Одноименные выводы всех вторичных обмоток ТА, питающих счетчики и приборы, заземляют через зажим на фланце трансформатора.

4.1.3. Цепи трансформаторов напряжения (TV). В цепях напряжения обращают внимание на заземление обмоток трансформатора напряжения и наличие защиты от КЗ. Место защитного заземления должно быть выбрано вблизи места установки TV. Заземление обмоток TV, соединенных в звезду и разомкнутый треугольник, производится непосредственно на трансформаторе или на ближайшей сборке зажимов отдельными заземлителями. Защита от КЗ должна выполняться, как правило, автоматическими выключателями, в том числе в цепи $3U_0$. Цепи напряжения должны быть проложены симметрично.

Чтобы предотвратить наведение в близко расположенных цепях напряжений, которые могут исказить значение и фазу сигналов и вызвать неправильное действие защиты, все проводные связи одного и того же назначения следует выполнять в одном и том же кабеле. Например, трех- или четырехпроводные цепи от основных вторичных обмоток трансформатора должны подаваться на щит одним кабелем. Двухпроводная цепь от обмотки однофазного трансформатора или от дополнительных обмоток (цепь $3U_0$) также не

должна разделяться по разным кабелям. Кабели от основных и дополнительных обмоток ТА до щита следует прокладывать рядом по всей длине. Не допускается раздельная разводка заземленных и незаземленных вторичных цепей TV жилами разных кабелей, так как при этом сумма токов в жилах каждого в отдельности кабеля не равна нулю; в результате возрастает индуктивное сопротивление кабеля и искажаются векторные диаграммы напряжений, подводимых к реле защиты.

Если требуется, измеряют полное (комплексное) сопротивление вторичных цепей переменному току методом амперметра — вольтметра. Это позволяет учесть не только активную, но и индуктивную составляющую сопротивления, которая может быть значительной (длинные соединительные провода, катушки расцепителей и др.). В проверяемую цепь должны входить все элементы схемы. В цепях обмоток, соединенных «звездой», измеряют сопротивление каждой пары фаз и каждой фазы с нулевым проводом и вычисляются средние значения сопротивления фазы и нулевого провода.

Потери напряжения во вторичных цепях TV можно измерить непосредственно, если расстояние от трансформатора до панели реле или измерительных приборов невелико. При больших расстояниях рекомендуется определять эту величину расчетным путем, пользуясь результатами измерения нагрузки и сопротивления цепей. С этой целью измеряется угол сдвига фаз между током наиболее нагруженной фазы и ее напряжением и рассчитывается потеря линейного напряжения $\Delta U \approx \sqrt{3}IR \cos \varphi$ или, не прибегая к определению $\cos \varphi$, с некоторым расчетным запасом принимают $\Delta U \approx \sqrt{3}IR$, где I и R — ток нагрузки и активное сопротивление фазы. Если нагрузка питается только по двум фазам без нулевого провода, то потерю напряжения можно принять равной $2IR$. Измерения и расчеты следует производить при максимально возможном значении тока нагрузки. Измеренные или вычисленные значения потерь напряжения не должны превышать: от TV до счетчиков 0,5; до щитовых приборов 1,5; до реле защиты 3 %.

Одновременно измеряют нагрузку всех фаз трансформатора напряжения. Амперметр включают в каждый кабель, подключенный к релейному щиту, или в ближайшем к трансформатору шкафу так, чтобы он учитывал всю нагрузку TV; класс точности прибора — 0,5. Поскольку нагрузка в цепях устройств РЗА неравномерна по фазам и при срабатывании этих устройств изменяется по-разному, необходимо внимательно проанализировать работу РЗА и выявить режим, в котором создается наибольшая нагрузка на TV.

Для всех TV обязательна проверка работы максимальной токовой защиты в опыте короткого замыкания во вторичных цепях с измерением тока КЗ. Выбирается такой вид КЗ, при котором значение тока будет минимальным, а место КЗ — в конце участка, защищаемого данным автоматом или предохранителем. Включение на КЗ производится дополнительным автоматическим выключателем. Кратность срабатывания электромагнитных расцепителей принимается обычно равной 3,5 номинального тока. В цепях схемы «разомкнутый треугольник» устанавливают автомат на номинальный ток 2,5 А.

Вместе с тем токовая защита вторичных цепей трансформатора напряжения не должна срабатывать от кратковременных бросков емкостного тока линии электропередачи, к которой он подключен, а также от пусковых токов

нагрузки. Чтобы проверить отстройку от зарядного тока, несколько раз включают и отключают линию. Значительные пусковые токи возникают в связи с тем, что питающиеся от TV электромагнитные аппараты имеют меньшее сопротивление и, соответственно, потребляют больший ток при включении, когда якорь (сердечник) опущен, чем в рабочем режиме, когда он подтянут. Чтобы проверить отстройку максимальной защиты от пусковых токов, рубильником или проверяемым автоматом несколько раз включают полную нагрузку трансформатора и убеждаются, что защита при этом не срабатывает.

На всех шинках, рядах зажимов, к которым подключены цепи напряжения, измеряют линейные и фазные напряжения, а также напряжения всех проводов относительно земли. Измеряют напряжение небаланса $3U_0$, которое должно составлять 1—3 В. Это значение, а также симметрия линейных и фазных напряжений схем «звезда» и «треугольник» подтверждают правильность монтажа вторичных цепей. Там же проверяют чередование фаз и маркировку проводов, затем поочередно подключают к цепям напряжения аппаратуру панелей, щитов, ячеек.

Фазировку производят на щитах, панелях, входных зажимах или между рядами зажимов разных ячеек РУ с трансформаторами напряжения. При этом вторичные цепи последних должны быть связаны электрически, например, заземлением их одноименных точек. Вольтметром проверяют напряжение между каждым зажимом той и другой цепей: напряжение между одинаковыми фазами должно быть близко к нулю, между разноименными — двойному линейному напряжению. Поэтому следует выбирать вольтметр с верхним пределом измерения не ниже 200 В и переходить на меньшие пределы, лишь убедившись в правильности сборки схемы.

В цепях управления выключателями прослеживают работу схемы в различных положениях ключа управления и блокировки от «прыгания» (многократного включения — отключения выключателя), в цепях сигнализации проверяют выбор добавочных сопротивлений, правильность подключения сигнальных реле и максимальное количество одновременно подаваемых сигналов.

4.1.4. Монтаж вторичных цепей. Внешним осмотром проверяется качество выполнения монтажа и составляется дефектная ведомость. Она передается монтажной организации для устранения дефектов и ремонта или замены оборудования, которое не соответствует проекту, параметрам объекта или находится в состоянии, препятствующем его нормальной эксплуатации.

Монтаж схем вторичной коммутации можно подразделить на два вида: внутренний и внешний. Внутренний — вторичная коммутация релейных панелей, щитов управления и сигнализации, приводов выключателей, камер КСО, КРУ, КТП — выполняется на заводах-изготовителях. Ошибки и дефекты монтажа здесь маловероятны и, если встречаются, носят обычно массовый характер, т. е. повторяются во всех экземплярах данного типа оборудования, установленного на подстанции. Чаще требуют проверки внешние связи — между панелями, щитами, камерами и пр. При однослойном простом монтаже проверка может выполняться визуально, путем просмотра каждого отдельного провода. Скрытый монтаж проводов (жгуты, многослойный монтаж, прокладка в перфорации, трубах), кабельные связи проверяются «прозвонкой» — с помощью «пробников», телефонных гарнитур, телефонной и радиосвязи

(в разных помещениях). Прозванивают выборочно те цепи, исправность которых вызывает обоснованные сомнения, полная же прозвонка всех цепей схемы нецелесообразна из-за чрезмерной затраты времени и не всегда возможна (печатный монтаж, например).

4.2. Токовые и токовые направленные защиты

4.2.1. Максимально-токовая защита (МТЗ) от перегрузки и многофазных коротких замыканий.

Проверка МТЗ от постороннего источника тока. Собирают схему защиты полностью и включают выключатели, на которые она должна действовать. Подают оперативное напряжение и производят проверку защиты первичным током от испытательного устройства, содержащего нагрузочный трансформатор, регулятор напряжения (автотрансформатор) и измеритель тока.

В зависимости от схемы защиты собирают одну из схем рис. 51 и, подавая ток в первичные цепи трансформаторов тока, повышают его до значения примерно 0,3–0,5 тока срабатывания защиты. При этом измеряют первичные и вторичные токи, проверяют коэффициенты трансформации ТА и правиль-

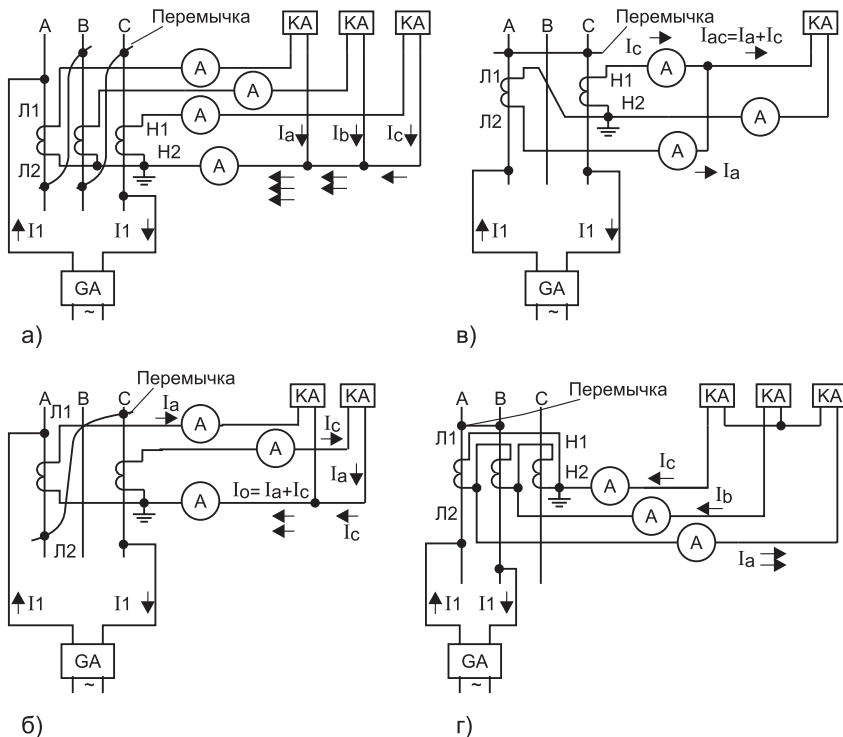


Рис. 51. Схемы проверки токовых цепей МТЗ при питании первичным однофазным током от постороннего источника и соединении обмоток ТА: а — в звезду; б — в неполную звезду; в — на разность токов двух фаз; г — в треугольник; GA — нагрузочное устройство; KA — реле тока

ность токораспределения в фазных и нулевом проводах. Ток в нулевом проводе должен быть: $I_0 = I_a + I_b + I_c$ (рис. 51а) или $I_0 = I_a + I_c$ (рис. 51б). Далее принимают первичный ток до срабатывания реле защит на максимальной уставке и измеряют соответствующие значения первичных и вторичных токов. Поскольку эта проверка является завершающей и разрывать полностью собранные цепи нежелательно, вместо амперметров на рис. 51 целесообразно использовать токоизмерительные клещи.

Проверка МТЗ на переменном токе с дешунтированием токовых цепей. Проверяется надежность действия электромагнитов отключения после дешунтирования катушек переключающим контактом промежуточного реле. При этом сопротивление вторичной цепи трансформатора тока увеличивается за счет введения в нее катушек отключения, а ток соответственно уменьшается. Необходимо, однако, чтобы он оставался больше тока возврата промежуточного реле, так как в противном случае реле отпадет и вновь зашунтирует катушку отключения. Это условие обеспечивается, если ток катушки отключения будет меньше тока срабатывания промежуточного реле в 1,5—2 раза.

Ток срабатывания катушки отключения можно снизить до 3—4 А при выполнении следующих требований:

- для реле РТМ и электромагнитов отключения касание бойком рычага отключающего валика должно происходить как можно позже, т. е. когда тяговое усилие их сердечников имеет наибольшее значение;
- для всех реле и электромагнитов запас хода бойка после расцепления отключающего механизма должен быть около 2 мм. Это достигается регулировкой длины бойка.

Необходимо также проверить расчетом надежность работы переключающих контактов реле, предназначенных для дешунтирования токов, до определенных значений, обычно до 150 А.

4.2.2. МТЗ от однофазных замыканий на землю. При использовании в сетях с малым током замыкания на землю трансформаторов тока нулевой последовательности необходимо иметь в виду следующие особенности.

При наличии нескольких параллельных кабелей на каждом из них устанавливается трансформатор тока. Вторичные обмотки ТА соединяются последовательно и к ним подключается реле тока. В этом случае чувствительность защиты оказывается меньше, чем при питании реле от отдельного ТА, и еще меньше — при параллельном соединении обмоток.

Для кабельных линий с трансформаторами тока типа ТЗЛ, ТНП должны быть соблюдены условия п. 2.4.7.1, рис. 19 (раздел 3). Провод, заземляющий кабельную воронку, должен быть изолирован. Расстояние от ТНП до концевых кабельных воронок должно быть не менее 0,7 м, а до ближайших участков ошиновки — не менее 1,5—2 м. Для ТНП шинного типа эти расстояния могут быть несколько меньше (0,5 и 1—1,5 м соответственно). Кабели располагаются в окне сердечника в один ряд или в два ряда в шахматном порядке, симметрично относительно центра окна. Рекомендуется, чтобы сопротивление соединительных проводов между ТНП и реле не превосходило 1 Ом. При большой протяженности соединительные провода экранируют; экран заземляют в одной точке.

Проверяют исправность изоляции концевых воронок и брони кабелей на участке между ТНП и защищаемым оборудованием, подавая поочередно ток в рассечку заземляющих проводов каждого кабеля, проходящего сквозь окно ТНП. При токе 10—20 А напряжение на обмотке исполнительного реле не должно превосходить 4—5 мВ.

Цепь подмагничивания включается на те фазы, при которых напряжение небаланса будет наименьшим. Следует убедиться, что ток небаланса во вторичной обмотке ТНП, обусловленный подмагничивающим напряжением 100 В, не превышает 2—4 % тока срабатывания реле защиты от замыкания на землю. Корректируют эту величину, доматывая в ту или иную сторону витки обмотки подмагничивания.

Проверяют защиту первичным током, для чего ток от постороннего источника пропускают через жилу силового кабеля, предварительно заземлив ее и один из выводов нагрузочного устройства. Если такое испытание затруднительно, допускается подавать ток в провод, пропущенный через окно ТНП. Защиту, включенную на трехтрансформаторный фильтр токов нулевой последовательности, проверяют подачей тока от постороннего источника на первичные обмотки ТА каждой фазы.

На заключительном этапе проверяют взаимодействие защит и устройств сигнализации с другими защитами, автоматикой, схемами управления и общестанционной сигнализации, а также действие защит на коммутационные аппараты. Проверка производится при оперативном напряжении 80 и 100 % номинального, замыканием контактов вручную.

Направленные защиты, как известно, предполагают наличие реле направления мощности, в связи с чем и наладка защит сводится, в основном, к проверке действия этих реле. Состав и объем проверки определяется режимом работы сети и видом короткого замыкания.

4.2.3. Направленная защита от многофазных коротких замыканий. Действие защиты можно проверить по векторной диаграмме рабочих токов и напряжений при имитации режима трехфазного КЗ, который принципиально не отличается от режима симметричной нагрузки.

При построении векторной диаграммы подводимые к реле напряжения принимаются за систему координат. По выражению для вращающего момента данного реле или опытным путем определяется угол, при котором вращающий момент становится равным нулю, и под этим углом относительно вектора напряжения U_{bc} проводится линия изменения вращающего момента. В качестве примера на рис. 52 приведено построение векторной диаграммы для реле РБМ171, включенного по 90-градусной схеме на напряжение U_{bc} и ток I_A . Поскольку при трехфазном КЗ на защищаемом присоединении активная и реактивная мощности направлены от шин к месту повреждения, вектор первичного тока $I_{Акз}$ фазы А (показан пунктирной линией) отстает от напряжения своей фазы на угол $\varphi_{кз}$ и находится вблизи линии максимальных моментов. Этот вектор расположен в зоне работы реле, которое должно замкнуть свои контакты и разрешить действие защиты на отключение.

Вектор тока в реле должен располагаться не ближе 20° к линии изменения знака вращающего момента. Если этот вектор оказывается вблизи линии ну-

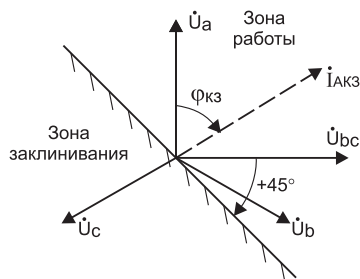


Рис. 52. Векторная диаграмма нагрузочного режима защиты от междуфазных КЗ с реле направления мощности РБМ171

левых моментов, реле направления мощности будет находиться в инертном состоянии. В этом случае рекомендуется подать в реле ток другой фазы, например, ток I_b фазы В. Реле включено правильно, если оно замыкает свои контакты при направлении активной мощности от шин, а реактивной — к шинам.

Подводить к реле рабочие токи и напряжения следует сразу после снятия векторной диаграммы, чтобы диаграмма токов нагрузки не успела измениться. Неправильная работа реле мощности чаще всего бывает вызвана ошибочной полярностью обмоток измерительных трансформаторов, реле и др. Когда реле мощности выполняет блокирующие функции и включено с обратной полярностью, следует учитывать, что зоны срабатывания и заклинивания у них отличаются от заводских на 180° .

4.2.4. Направленная защита нулевой последовательности. Проверка производится по векторной диаграмме тока нагрузки и рабочего напряжения при имитации однофазного КЗ у шин подстанции. При этом напряжение поврежденной фазы снижается до нуля, и по ней протекает ток к месту КЗ.

Однофазное КЗ создают искусственно, подавая на выводы проверяемой защиты ток поврежденной фазы и напряжение нулевой последовательности, равное сумме напряжений неповрежденных фаз. С этой целью в реле поочередно подают три фазных тока и устанавливают, в каком случае реле будет иметь достаточно большой момент на срабатывание или заклинивание.

Для создания напряжения нулевой последовательности из напряжения разомкнутого треугольника исключают напряжение той фазы, на которой имитируется КЗ: первичную цепь этой фазы разрывают, а обмотку TV закорачивают. Можно также имитировать однофазное КЗ и по вторичным цепям напряжения, подключив к реле вместо свободного конца обмотки данной фазы TV тот ее вывод, который связан с другой фазой в схеме разомкнутого треугольника. В обоих случаях напряжение на реле будет $3U_0 = U_B + U_C = -U_A$.

В качестве примера на рис. 53 приведена векторная диаграмма применительно к реле РБМ178. Построение ее аналогично описанному выше для защит от междуфазных КЗ с реле РБМ171. На векторную диаграмму токов нагрузки наносят линию нулевых моментов под углом 20° (внутренний угол реле). Реле направления мощности включено правильно, если вектор тока находится в зоне работы реле.

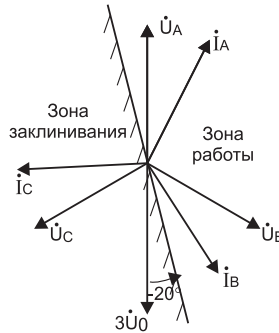


Рис. 53. Векторная диаграмма нагруженного режима защиты нулевой последовательности с реле РБМ178

Когда вектор тока поврежденной фазы оказывается вблизи линии нулевых моментов, через реле пропускают поочередно токи всех трех фаз и анализируют поведение реле. Если активная и реактивная мощности направлены от шин подстанции в линию и реле, включенное на напряжение $3U_0$, при токе I_A четко замыкает свои контакты, при токе I_B имеет небольшой момент на замыкание, а при токе I_C четко заклинивает, то реле включено правильно.

По условиям термической стойкости напряжение на реле следует подавать кратковременно.

4.3. Дистанционная защита

4.3.1. Опробование. Замыкая и размыкая контакты вручную, проверяют работу защиты по принципиальной схеме. При использовании в качестве элемента сравнения полупроводниковых нуль-индикаторов проверяют выходные цепи от контактов реле исполнительных органов, а при опробовании магнитоэлектрических реле их контакты закорачивают. Опробование осуществляют при оперативном напряжении, равном 80 % номинального. Окончательная проверка защиты производится имитацией аварийных режимов при номинальном оперативном напряжении.

1. Проверяют действие дистанционных реле от тока при разомкнутых цепях напряжения по уставкам I, II и III зон. Измеряют токи срабатывания дистанционных и пусковых реле и сравнивают их с максимальными токами нагрузки, что позволяет оценить возможность ложной работы защиты при исчезновении вторичного напряжения TV.

2. Проверяют поведение защиты при двухфазном КЗ, когда напряжение поврежденных фаз уменьшается до нуля. При имитации повреждения вблизи шин в зоне действия защиты к реле подводят максимальный ток двухфазного КЗ под углом $\varphi_{м.ч}$ к напряжению в предаварийном режиме. Защита должна работать с выдержкой времени I зоны. При имитации КЗ вне зоны аварийный ток подводят под углом $\varphi_{м.ч} + 180^\circ$.

3. Проверяют поведение защиты при имитации трехфазного КЗ вблизи шин в зоне работы и «за спиной» (т. е. при обратном направлении тока), надежность работы выходных реле и время срабатывания защиты. При макси-

мальном значении тока в этом режиме измеряется также время замкнутого состояния контактов выходного реле.

Контролируют поведение защиты при имитации трехфазного КЗ «за спиной» при минимальном значении аварийного тока, так как в этом режиме вероятность ложного срабатывания защиты наиболее велика.

Имитируя повреждение на фазах АВ, ВС и СА, измеряют время срабатывания (на контактах выходного реле) при заданных углах и токах настройки. Временная характеристика проверяется для следующих уставок сопротивления:

| Степень | I | II | III |
|---------------|------------------------|---------------------------|--|
| Сопротивление | 0; $0,5Z_I$; $0,9Z_I$ | $1,1Z_{II}$; $0,9Z_{II}$ | $1,1Z_{III}$; $0,9Z_{III}$; $1,1Z_{III}$ |

При значениях Z , равных $1,1Z_I$ и $1,1Z_{II}$, регулируется выдержка времени защиты; при $Z = 1,1Z_{III}$ защита работать не должна.

В заключение следует убедиться, что при подаче и снятии трехфазного напряжения защита не срабатывает.

4.3.2. Проверка защиты рабочим током и напряжением. Для подтверждения правильности сборки схем трансформаторов тока и напряжения и подключения их цепей к панели проверяются:

- исправность и правильность подключения к панели цепей напряжения — измерением линейных и фазных напряжений и фазировкой с другими панелями и цепями напряжения;
- исправность и правильность подключения токовых цепей путем снятия векторной диаграммы и сопоставления ее с действительным направлением первичной мощности в линии;
- правильность подключения фильтра обратной последовательности (напряжения или тока), для чего измеряются токи небаланса в обмотках исполнительных реле. Если ток небаланса превышает 50 % тока возврата поляризованного реле, необходимо повторно проверить симметрию токов нагрузки в фазах и с помощью переменных резисторов в плечах фильтра свести небаланс к минимуму. Изменив чередование фаз напряжения (тока) на обратное, фиксируют состояние реле (срабатывает — не срабатывает) при значительно возросшем токе;
- правильность подключения устройства блокировки при неисправности в цепях напряжения (отключение автоматических выключателей или обрыв в одной, двух или трех фазах TV) путем измерения тока небаланса в обмотке поляризованного реле, блокирующего защиту; в нормальном режиме, а также в симметричных режимах при междуфазных КЗ и при замыканиях на землю, ток небаланса не должен превышать 50 % тока возврата реле. Считается, что блокировка будет действовать надежно, если ток в реле при отключении напряжения превышает ток срабатывания более чем в 4 раза.

По окончании проверки восстанавливают нормальную схему цепей напряжения и вновь измеряют ток небаланса в рабочем режиме.

Дистанционные защиты в сетях 35—110 кВ принадлежат к числу наиболее сложных; технология наладки конкретных видов их подробно описывается в соответствующих руководствах и инструкциях.

4.4. Дифференциальные защиты

4.4.1. Общие рекомендации. Как правило, проверку защиты производят первичным током нагрузки при рабочем напряжении. Предварительную проверку выполняют током от однофазного или трехфазного источника, напряжение которого (в пределах от 0,4 до 10 кВ) выбирается в зависимости от мощности испытуемой цепи, а ток КЗ источника должен быть соизмерим с номинальным током последней.

При имитации КЗ вне зоны защиты измеряют значения и фазы токов как в плечах ДЗ, так и в дифференциальной цепи, токи и напряжения в исполнительных органах дифференциальных реле. Измерение тока небаланса производится миллиамперметром с небольшим внутренним сопротивлением при токе нагрузки не менее 10—20 % номинального значения. При меньших токах значение тока небаланса может оказаться достаточно малым для того, чтобы привести к ложному выводу об исправности токовой защиты даже при неправильном соединении токовых цепей.

Значительно меньше трудозатрат и времени требует проверка от постороннего источника малой мощности, например, трехфазного с напряжением 380 В и током КЗ порядка нескольких десятков ампер, т. е. 5—10 % номинального тока испытуемой цепи. При этом можно установить векторные соотношения токов плеч ДЗ, но состояние дифференциальных цепей и правильность выравнивания МДС дифференциальных реле достоверно не определяются.

Проверку ДЗ током от постороннего источника производят в следующем порядке.

1. При имитации КЗ вне зоны защиты: а) измеряют токи в фазных, нулевых и дифференциальных проводах; б) измеряют токи (напряжения) небаланса измерительных органов дифференциальных реле; в) снимают векторные диаграммы токов в фазных и нулевых проводах плеч защиты.

2. Имитацию КЗ в зоне защиты осуществляют закорачиванием, отсоединением и заземлением плеча ДЗ или поочередным снятием крышки испытательного блока каждого плеча. Измерения выполняют в том же порядке, как и при имитации КЗ вне зоны.

Окончательная проверка ДЗ производится током нагрузки первичной цепи под рабочим напряжением. Значение тока небаланса, измеренное в полностью собранной схеме защиты, сравнивается с данными, полученными для других защит того же типа в одинаковых условиях. Ток небаланса должен быть значительно меньше, чем необходимо для срабатывания защиты. При токе нагрузки 0,5—1,0 номинального небаланс считается допустимым, если напряжение на обмотке исполнительного органа дифференциальных реле не превышает 4 % напряжения срабатывания.

4.4.2. Продольная ДЗ кабельных линий. Проверка схемы может быть произведена с помощью постороннего источника однофазного тока. Нагрузочное устройство подключается поочередно к двум фазам в начале КЛ, на другой стороне которой устанавливается временная закоротка между теми же фазами. В этом случае имитируется КЗ на линии вне зоны защиты. Если линия реактивирована, то для снижения требуемой мощности нагрузочного устройства реакторы следует зашунтировать. При правильно собранной схеме ДЗ и подаче тока, например, в фазы А — В, как это показано на рис. 54а, токи в фазах должны быть: $I_{a1} = I_{b1} \approx I_{a2} = I_{b2}$; $I_{c1} = I_{c2} = 0$; токи в реле и ток небаланса должны быть близки к нулю.

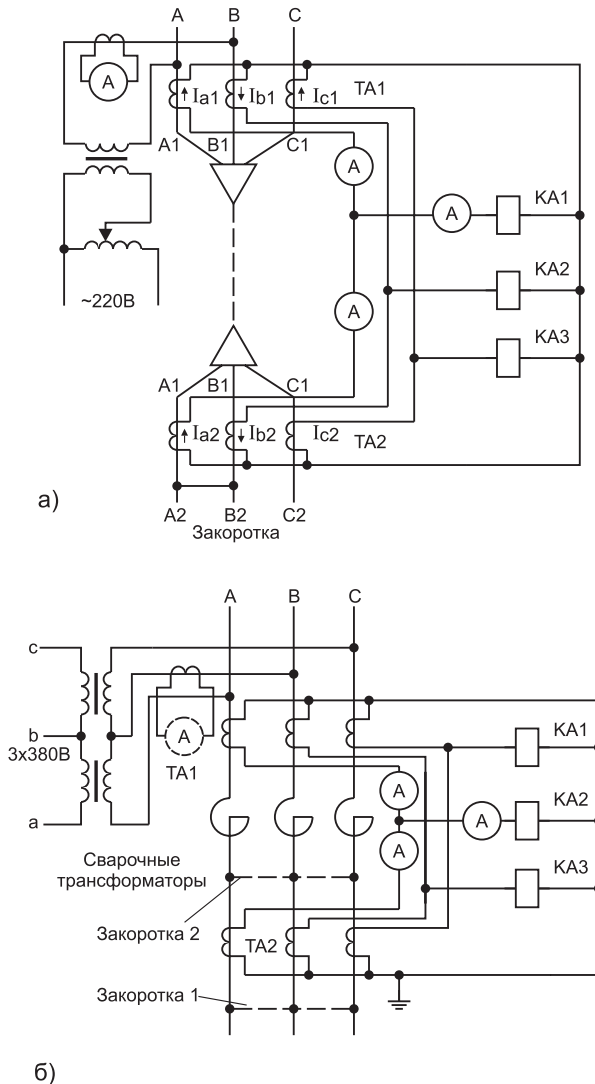


Рис. 54. Схемы проверки дифференциальной защиты линий током нагрузки:
а — от однофазного источника; б — от трехфазного источника

Проверку ДЗ трехфазным током можно выполнить с помощью двух однофазных нагрузочных трансформаторов, например сварочных, включенных по схеме неполной звезды (рис. 546). Здесь установка закоротки 1 позволяет имитировать КЗ вне зоны защиты (сквозное КЗ), закоротки 2 — в зоне защиты. В первом случае фазные токи в начале и конце линии примерно равны, а через реле протекает лишь ток небаланса. Во втором случае каждое реле обтекается током, близким к току данной фазы в зоне действия защиты.

В реактированной линии с индуктивным сопротивлением реакторов 8—10 % возможно также проверить дифференциальную защиту током нагрузки от сети 380 В достаточной мощности.

4.4.3. Направленная поперечная дифференциальная защита двух параллельных линий и ДЗ шин. Проверка производится пофазно током нагрузки от постороннего источника. Нагрузочное устройство подключается к обеим линиям со стороны питания, а с противоположной стороны трансформаторов тока линии соединяются временной перемычкой. При этом ток в обмотке реле должен быть вдвое больше тока в плече защиты. После включения линий под нагрузку измеряется ток небаланса в реле. Схема защиты может быть проверена также путем отключения одной из линий либо включением только одной линии, либо поочередным снятием крышек испытательных блоков плеч защиты — током нагрузки при рабочем напряжении.

Проверка направленности защиты производится так же, как и для реле направления мощности, включенных на полные токи и напряжения. Имитация аварийных условий осуществляется поочередной подачей тока нагрузки пофазно в реле каждой из параллельных линий. Под действием каждого из фазных токов одной линии подвижные системы реле должны отклоняться в ту же сторону и замыкать цепь отключения одной и той же линии, а при поочередной подаче токов одноименных фаз — отклоняться в разные стороны.

Построение векторной диаграммы и определение зоны работы защиты производится так же, как и для реле направления мощности защит от однофазных и междуфазных КЗ, только в данном случае строятся векторы вторичных токов обеих линий. При этом вектор вторичного тока нагрузки и вектор первичного тока в одной из линий должны совпадать, в другой — находиться в противофазе. Если активная и реактивная мощности направлены от шин подстанции, и реле, включенное на напряжение U_{AC} , с током I_{a1} отключает первую линию, а с током I_{a2} — вторую, то реле включено правильно.

Проверку ДЗ шин производят от постороннего источника трехфазного или однофазного тока. Сначала проверяют цепи трансформаторов тока обходного или шиносоединительного выключателя РУ, желательно от трехфазного источника (например, от трансформатора собственных нужд), и снимают векторные диаграммы. Соединяют данный выключатель последовательно с любым другим, за этим последним устанавливают закоротку и подают ток в первичную цепь выключателей. Снимают векторные диаграммы и измеряют ток небаланса в дифференциальных цепях, значение которого должно быть при этом близко к нулю. Далее переносят закоротку за третий выключатель и повторяют те же операции.

В схеме дифзащиты двойной системы шин шиносоединительный выключатель должен быть снабжен двумя комплектами трансформаторов тока.

В пределах РУ токовые цепи этих комплектов должны быть разобщены. Соединение токовых цепей защит обеих систем шин должно быть выполнено на панели дифференциальной защиты шин после избирательных органов.

4.5. Защита силовых трансформаторов и автотрансформаторов

4.5.1. Защита с газовыми и струйными реле. Для внутреннего осмотра реле из его корпуса сливается масло. У поплавковых и лопастных реле особое внимание обращается на установку и крепление грузов, регулирующих плавучесть поплавков и чувствительность лопасти. Проверяется легкость хода и отсутствие заедания в движущихся частях, отсутствие трещин в поплавках и стеклянных баллончиках ртутных контактов, особенно в местах вывода электродов. Выводы должны располагаться сверху колбочек.

Изоляционный промежуток между контактами проверяется мегаомметром 1000 В при погруженной в масло выемной части реле. Дефектные контакты излучают фиолетовый свет, сопротивление изоляции их близко к нулю. Контакты испытываются 10-кратным замыканием и размыканием при токе около 1 А и напряжении 220 В постоянного тока. Для реле производства иностранных фирм значение тока принимается по данным изготовителя, а при их отсутствии — как для отечественных. Если после испытания на стекле или ртути образуется налет, реле бракуется.

При осмотре выемной части чашечных реле тщательно проверяется надежность крепления деталей, люфты, легкость хода и отсутствие заедания движущихся частей, расстояние между подвижными и неподвижными контактами (2—3 мм), их параллельность и расположение в одной плоскости. Ход движущихся частей проверяется нажатием от руки; подвижные контакты должны скользить по середине пластин неподвижных контактов

Проверяется действие реле на сигнал (при понижении уровня масла в результате скопления определенного количества газа в верхней части реле — обычно около 400 см³, у реле Бухгольца — 300 см³) и на отключение (при полном уходе масла из реле). Эта проверка производится, как правило, в собственном корпусе реле: на крышке его открывается кран для доступа воздуха, а через нижнюю пробку медленно сливается масло. Чтобы при заполнении газом или воздухом нижней части реле отключающий элемент не срабатывал, нужно убедиться, что уровень масла, при котором он срабатывает, ниже уровня, обеспечивающего свободный выход газов в расширитель. Разность этих уровней определяет запас надежности, значение которого задается изготовителем в зависимости от чувствительности отключающего элемента к скорости потока масла и от диаметра трубопровода (не менее 10 мм).

В обслуживаемых установках отключение трансформатора при понижении уровня масла нежелательно. Однако при серьезных повреждениях, сопровождающихся бурным газообразованием, требуется отключение трансформатора. В таких случаях, например, при повреждениях в контакторе устройства РПН, происходит интенсивное разложение масла, струя которого вместе с газами направляется по трубопроводу в расширитель. Для контроля струи устанавли-

вается либо газовое, либо специальное струйное реле, всегда работающее на отключение. В таких реле струя попадает на пластину, которая поворачивается, а связанный с нею магнит приближается к геркону, вызывая замыкание его контакта. Реле имеет контрольно-возвратное устройство, с помощью которого можно не только вернуть реле в исходное положение, но и замкнуть его контакты для проверки как самого реле, так и цепей защиты. Сопротивление изоляции между герконовыми контактами следует измерять мегаомметром 500 В, а при испытании изоляции повышенным напряжением — закортить их.

Необходимо проверить надежность отстройки отключающего элемента газового реле от слабого газообразования. С этой целью осуществляется плавное заполнение корпуса реле через его верхний кран воздухом от бачка со сжатым воздухом или от автомобильного насоса. Вытеснение масла воздухом можно наблюдать через смотровое стекло. После снижения уровня масла до срабатывания сигнального элемента нагнетаемый воздух должен свободно проходить в расширитель, что сопровождается характерным шумом; отключающий элемент при этом действовать не должен.

Затем перекрывают кран в маслопроводе между газовым реле и расширителем и продолжают нагнетание воздуха до срабатывания отключающего элемента. Можно облегчить эту операцию, слив 2—3 ведра масла через нижний кран трансформатора.

Для срабатывания отключающего элемента нужно нагнетать воздух резко и неравномерно, чтобы создать толчок масла. Если таким образом добиться срабатывания не удастся, можно достичь этого открытием крана в маслопроводе после нагнетания в реле воздуха.

В трансформаторах с форсированным воздушным охлаждением или с принудительной циркуляцией масла необходимо убедиться, что реле не срабатывает при пуске и останове вентиляторов и циркуляционных насосов, а также при всех возможных переключениях вентилей в системе маслопроводов. Проверка производится пяти-шестикратным выполнением указанных операций.

Правильность сборки схемы защиты проверяется осмотром цепей на панели защиты, прозвонкой кабелей и проверкой маркировки реле, отключающих устройств, сигнальных ламп, сборок зажимов и жил кабелей. Проверяется напряжение срабатывания и возврата промежуточных реле и ток срабатывания сигнальных реле. После испытания изоляции проверяется надежность контактных соединений и взаимодействие реле при напряжении оперативного тока 80 и 100 % номинального. Наконец, замыканием выводов сигнальных и отключающих контактов газового реле имитируется его срабатывание и проверяется взаимодействие всех элементов защиты в соответствии с принципиальной схемой. Опробуется действие сигнализации и защиты на отключение выключателей.

Если после включения трансформатора под напряжение газовая защита срабатывает на сигнал, то следует: проверить наличие газа, обращая внимание на его цвет и количество; проверить уровень масла в расширителе; произвести внешний осмотр трансформатора с целью выявления признаков повреждения (ненормальное гудение, повышенный шум, треск, течь масла и др.). Когда такие признаки отсутствуют и газы, скопившиеся в реле, бесцветны и негорю-

чи, трансформатор может быть вновь поставлен под напряжение. Требуется только периодически выпускать из газового реле воздух, пока процесс его выделения не прекратится.

Если же при проверке в реле обнаруживаются горючие газы, трансформатор надо отключить и незамедлительно (цвет газа быстро меняется) установить его количество, цвет и горючесть. Количество газа определяется по делениям на смотровом стекле, цвет — на глаз через смотровое стекло и после взятия пробы. По характеру скопившихся в реле газов можно судить о виде и степени повреждения трансформатора:

- а) невоспламеняющийся газ, без цвета и запаха масла указывает на наличие воздуха;
- б) бело-серый газ, невоспламеняющийся, с острым запахом свидетельствует о повреждении изолирующих материалов;
- в) желтый газ, трудно воспламеняющийся — признак повреждения деревянных элементов;
- г) темно-синий или черный легко воспламеняющийся газ свидетельствует о наличии дуги в масле или о чрезмерном перегреве масла.

Проверку горючести газов разрешается производить только у краника в крышке реле, слегка приоткрыв его. При зажигании газа спичку надо держать несколько в стороне от крана, немного (на 4—5 см) выше его отверстия.

Те же операции по проверке газов в реле выполняют и в случае, когда трансформатор отключается от действия газовой защиты.

4.5.2. Дифференциальная защита. Проверку защиты осуществляют током нагрузки от постороннего источника симметричного трехфазного тока, либо от уравнительных токов двух параллельно работающих трансформаторов, либо от проверяемого трансформатора. При проверке измеряются токи во всех фазах и в нуле, напряжение небаланса на реле, обтекание током цепей защиты и снимаются векторные диаграммы. Имитация работы защиты производится путем пофазного отключения тока в цепях ДЗ с одной ее стороны.

1. Для проверки током нагрузки от постороннего источника обмотка НН трансформатора закорачивается, а на обмотку ВН подают напряжение от источника питания, обычно от трансформатора собственных нужд подстанции. Через трансформатор будет проходить испытательный ток

$$I_{\text{исп}} = I_{\text{н}} U_{\text{исп}} / U_{\text{н}} u_{\text{к}},$$

где $U_{\text{исп}}$ — напряжение источника питания; $I_{\text{н}}$ — номинальный ток трансформатора; $U_{\text{н}}$ — номинальное напряжение обмотки ВН; $u_{\text{к}}$ — напряжение КЗ трансформатора.

Необходимая мощность источника питания будет

$$P_{\text{и.п}} = (P_{\text{н}} / u_{\text{к}}) (U_{\text{и.п}} / U_{\text{н}})^2,$$

где $P_{\text{н}}$ — номинальная мощность трансформатора.

2. Уравнительный ток двух силовых трансформаторов, включенных параллельно, получается путем установки переключателей ответвлений обмоток трансформаторов в неодинаковые положения (в режиме холостого хода или

при малой нагрузке). Значение уравнильных токов должно быть достаточным для снятия векторных диаграмм.

3. При испытании любым из указанных способов снимают *векторные диаграммы* токов. Питание цепей напряжения фазометра осуществляют от постороннего источника симметричного трехфазного напряжения, синхронного с напряжением проверяемого трансформатора, например от трансформатора напряжения на стороне ВН или НН. Значение тока нагрузки трансформатора должно быть не менее 20—30 % номинального. *Квадрант*, в котором располагается вектор тока, определяется согласно следующим правилам:

- за положительное направление мощности и тока принято направление их от шин подстанции (знак «+»), и наоборот (знак «-»);
- значение активной мощности (тока) считается положительным, когда вектор тока совпадает с положительным направлением вектора одноименного фазного напряжения (ось +P);
- значение реактивной мощности (тока) считается положительным, когда вектор тока отстает на 90° от вектора одноименного фазного напряжения (ось +Q).

Вектор тока, например, фазы А, может располагаться относительно вектора «своего» напряжения U_A во всех четырех квадрантах в зависимости от направления активной и реактивной мощностей в соответствии с рис. 55. То же относится, конечно, и к фазам В и С.

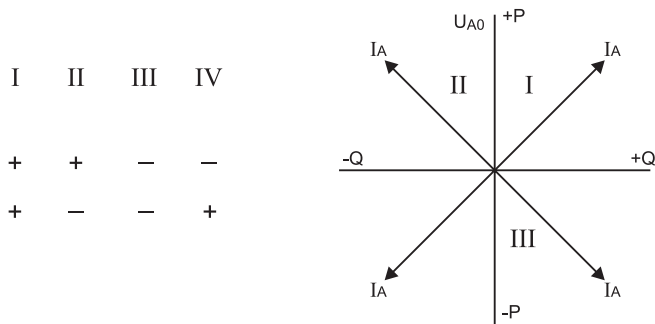


Рис. 55. Направление активной и реактивной мощности и векторов тока (для фазы А)

| Квадрант, в котором расположен вектор тока I_A | I | II | III | IV |
|--|---|----|-----|----|
| Активная мощность | + | + | - | - |
| Реактивная мощность | + | - | - | + |

Чтобы построить вектор первичного тока, необходимо знать, в каком квадранте и под каким углом к напряжению он расположен. Для этого следует определить направления и значения активной и реактивной мощностей (или соотношение между ними), например, по показаниям щитовых ваттметров. Если такие приборы отсутствуют, не проверены или не обладают достаточной чувствительностью, то необходимо создать в первичной цепи переток мощности в определенном направлении. Так, например, в режиме одностороннего

питания активная мощность всегда направлена от источника питания к потребителю. То же относится и к реактивной мощности, но при условии, что на приемном конце нет источников реактивной мощности (статических конденсаторов, синхронных машин и др.); в противном случае направление реактивной мощности может быть любым. Следует учитывать, что источниками реактивной мощности, направленной к шинам подстанции, могут быть также протяженные воздушные и кабельные линии высокого напряжения.

Направление реактивной мощности в линии можно определить и по известным значениям напряжения на соседних подстанциях: реактивная мощность всегда направлена к шинам подстанции с более низким напряжением. Использование такого способа возможно лишь при наличии достаточной разницы между напряжениями на подстанциях, значительно превышающей погрешности измерений.

Снятие векторной диаграммы токов выполняют в следующем порядке.

1. Сразу после включения трансформатора под напряжение сети или стороннего источника питания проверяют обтекание током фазных, нулевых проводов токовых цепей в плечах ДЗ, в дифференциальных цепях, в цепях других трансформаторов тока.

2. Измеряют напряжение и ток небаланса обмотки исполнительного органа каждого дифференциального реле; значение напряжения должно быть не более 0,2 В, а тока 2—10 А при номинальной нагрузке.

3. Проверяют чередование фаз и симметрию напряжений.

4. Измеряют значение и фазу токов в фазных и нулевых проводах токовых цепей в плечах ДЗ, в дифференциальных цепях.

5. При поочередном отключении токов плеч ДЗ измеряют токи в дифференциальных реле.

6. Строят векторную диаграмму и убеждаются, что на ней: векторы тока симметричны; векторы тока и векторы напряжения чередуются в одинаковом порядке; векторы тока в плечах одного реле направлены в противоположные стороны.

После снятия векторной диаграммы измеряются токи небаланса в цепях реле дифзащиты. При номинальной нагрузке ток небаланса в обмотке исполнительного органа каждого дифференциального реле должен быть в пределах 2—10 мА, а напряжение небаланса на этой обмотке — не более 0,2 В.

Наиболее удобно снимать векторные диаграммы прибором типа ВАФ, так как он позволяет получить диаграммы как токов, так и напряжений, и при использовании токоизмерительных клещей не требует разрыва цепей тока. Снятие векторной диаграммы с помощью ВАФ и фазометра производится аналогично. При отсутствии прибора типа ВАФ или фазометра можно воспользоваться однофазным ваттметром.

Сущность последнего метода состоит в следующем. Выражение для активной мощности любой фазы можно записать в виде:

$$P = UI \cos \varphi,$$

где U и I — напряжение и ток фазы соответственно, φ — угол фазного сдвига между ними. Поскольку произведение $I \cos \varphi$ есть проекция вектора тока на направление вектора напряжения, то ее можно оценить значением активной

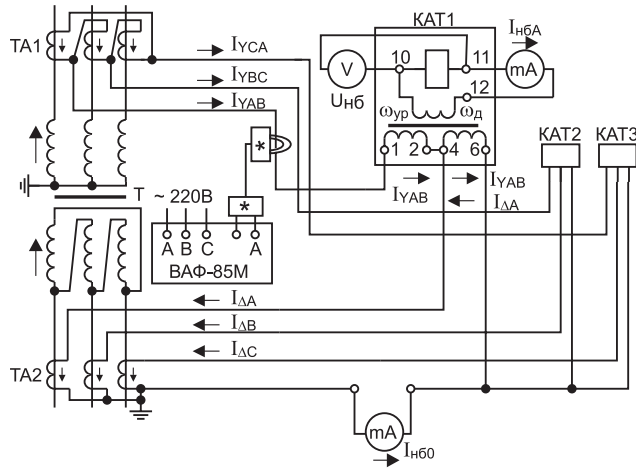
мощности, но при условии, что значения напряжения всех трех фаз будут одинаковы.

За систему координат принимают три фазных или междуфазных напряжения симметричной трехфазной системы А, В, С, а вектор тока определяют по любым двум его проекциям на оси координат: I_{oa} и I_{ob} , или I_{oa} и I_{oc} , или I_{ob} и I_{oc} . Восставив перпендикуляры из концов этих отрезков, получим на их пересечении точку, определяющую конец искомого вектора, а стало быть, и сам вектор тока. Если при этом окажется, что перпендикуляры пересекаются не в одной точке, то за конец вектора тока принимают точку в центре образовавшегося треугольника. Сумма всех трех проекций тока каждой фазы должна быть равна нулю.

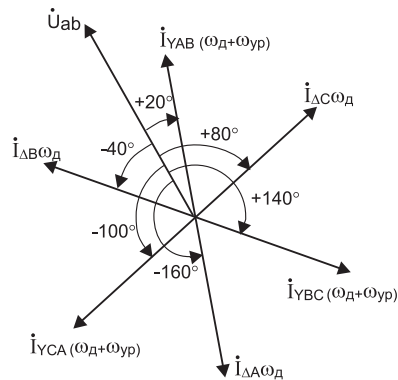
Сами эти проекции находят следующим образом. К однофазному ваттметру поочередно подводят фазные напряжения, причем к «концу» потенциальной обмотки подсоединяют нулевую точку цепи напряжения. Токовую обмотку ваттметра включают в цепь трансформатора тока данной фазы так, что «начало» обмотки (зажим * или +) соединяется с его фазным выводом, а «конец» — с нулевой точкой ТА, собранных в звезду. Отсчитывают показания ваттметра для каждой фазы, считая их положительными при отклонении стрелки прибора вправо, а влево — отрицательными, и проверяют, равна ли нулю алгебраическая сумма всех трех показаний ваттметра. Случай, когда эта сумма отличается от нуля, как раз и соответствует образованию упомянутого выше треугольника на векторной диаграмме. Далее, выбрав удобный масштаб, откладывают показания ваттметра (с учетом знака) на векторной диаграмме и строят вектора токов всех фаз. Абсолютные значения токов находят непосредственным измерением.

Если при снятии векторной диаграммы были выполнены все требования и полярности приборов и измерительных трансформаторов соблюдены, то векторы тока, построенные согласно снятой диаграмме, будут располагаться в тех же квадрантах, что и первичный ток. При правильном включении токовых цепей дифференциальной защиты геометрическая сумма МДС для каждой фазы должна равняться нулю.

В качестве примера на рис. 56 приведены схема проверки дифференциальной защиты с реле типа РНТ565 рабочим током трансформатора и векторная диаграмма. Обмотка ВН трансформатора собрана по схеме «звезда», обмотка НН — «треугольник». Для измерения значений и фаз токов в плечах защиты используется прибор ВАФ-85М (рис. 56а). В качестве ориентирующего (опорного) принято напряжение U_{ab} . Ввиду того, что вторичные токи в плечах защиты непосредственно не компенсируются, строятся векторы МДС. Значения углов между вектором опорного напряжения и векторами токов, полученные в результате шести измерений, указаны на рис. 56б. На диаграмме видно, что векторы трех токов в плечах защиты как со стороны ВН, так и со стороны НН, сдвинуты между собой на 120° , а токи в плечах одного реле направлены противоположно. Пусть, например, значения этих токов составляют 4 и 4,5 А соответственно, а на дифференциальной и уравнивающей обмотках реле РНТ выставлено число витков $w_d = 15$ и $w_{yp} = 2$; тогда для фазы А, в частности, результирующая МДС будет $I_{\Delta A} w_d - I_{YAB} (w_d + w_{yp}) = 4,5 \times 15 - 4(15 + 2) \approx 0$, что и требуется.



а)



б)

Рис. 56. Проверка дифференциальной защиты трансформатора под нагрузкой: а — схема включения приборов; б — векторная диаграмма магнитодвижущих сил

4.6. Защита электродвигателей

4.6.1. Проверка основных данных. Релейная защита электродвигателей переменного тока (ЭД) выполняется и проверяется в основном по тем же правилам, что и для других видов электрооборудования; ниже рассматриваются только существенные отличия. Перед пуском ЭД должны быть подтверждены его основные данные: кратность пускового тока, отношение короткого замыкания (ОКЗ) синхронного ЭД, время разворота при пуске и др.

Кратность пускового тока может быть определена непосредственно путем осциллографирования, если это не вызывает затруднений. Этот способ дает полную картину переходного процесса тока, включая бросок тока намагничивания. Установившееся значение пускового тока (см. рис. 26, раздел 3, п. 1)

можно определить и на пониженном напряжении. С этой целью на статор ЭД подают напряжение $\sim 3 \times 380$ В и, медленно проворачивая ротор от руки, отмечают наибольшее значение тока по амперметру (при повороте ротора ток может несколько изменяться). Кратность пускового тока определяется из выражения

$$k = I_{\text{оп}} U_{\text{н}} / I_{\text{н}} U_{\text{оп}},$$

где $I_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$ — номинальные, а $I_{\text{оп}}$, $U_{\text{оп}}$ — значения тока и напряжения, полученные из опыта, соответственно. В действительности значение $k_{\text{п}}$ оказывается несколько выше рассчитанного из-за большего насыщения стали машины при рабочем напряжении и находится обычно в пределах 5...8.

Величина ОКЗ является по-существу характеристикой синхронного генератора, но может быть определена и в случае, когда синхронная машина предназначена для работы в режиме двигателя, если это необходимо (машина большой мощности, паспортные данные вызывают сомнение или отсутствуют и др.). С этой целью работающий двигатель переводят в генераторный режим, сняв питающее напряжение со статора, и измеряют требуемые параметры на выбеге машины.

Под ОКЗ понимается обычно отношение установившегося тока $I_{\text{к}}$ симметричного трехфазного КЗ на выводах машины при токе возбуждения $i_{\text{во}}$, соответствующем номинальному напряжению статора на холостом ходу, к номинальному току статора $I_{\text{н}}$:

$$\text{ОКЗ} = I_{\text{к}} / I_{\text{н}}.$$

Учитывая, что ток КЗ и ток возбуждения связаны линейной зависимостью, это отношение можно записать и так:

$$\text{ОКЗ} = i_{\text{во}} / i_{\text{вк}},$$

где $i_{\text{вк}}$ — ток возбуждения, при котором ток КЗ равен номинальному: $I_{\text{к}} = I_{\text{н}}$.

Ток $i_{\text{во}}$ можно найти по характеристике холостого хода (ХХ), если она представлена в документах. Надо только иметь в виду, что из-за наличия остаточного намагничивания снятая характеристика не проходит через начало координат, и ее необходимо сдвинуть по горизонтальной оси на величину $\Delta i_{\text{в}}$, как это показано на рис. 57а. Если же характеристика ХХ отсутствует, то найти ток $i_{\text{во}}$ экспериментально проще всего следующим путем. При напряжении, равном номинальному, изменяют возбуждение ЭД так, чтобы потребляемый им ток статора был наименьшим. Установленное таким образом значение тока возбуждения практически не будет отличаться от полученного по характеристике холостого хода.

Во время выбега можно осуществить и опыт короткого замыкания. Цепь КЗ подготавливается заранее. Проводники коротки у выключателя Q2 (рис. 57б) должны иметь минимальную длину и сечение, достаточное для ожидаемого тока. Немедленно после отключения выключателем Q1 вращающейся машины от сети с нее снимается возбуждение, выключателем Q2 производится короткое замыкание и тотчас возбуждение поднимается вновь,

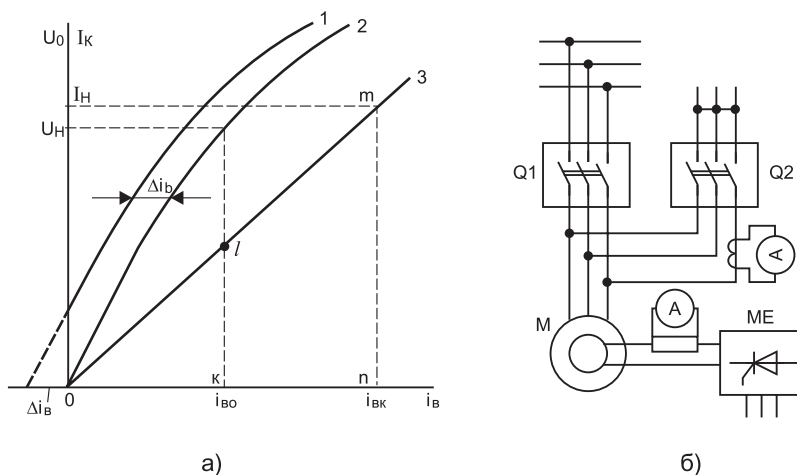


Рис. 57. К снятию характеристик холостого хода и короткого замыкания синхронного двигателя: а — характеристики холостого хода: 1 — снятая характеристика ХХ; 2 — смещенная характеристика ХХ; 3 — характеристика короткого замыкания; б — принципиальная схема включения приборов и аппаратов: М — синхронный двигатель; МЕ — возбудитель; Q1, Q2 — выключатели; А — амперметры постоянного и переменного тока. Цепи измерения напряжения не показаны

пока не установится ток КЗ, близкий к номинальному значению. Характеристика КЗ прямолинейна и потому достаточно сделать три-четыре отсчета. Изменение частоты вращения не влияет на результаты измерения, при условии, что во время опыта она остается выше 15—20 % номинальной и снижается не быстрее, чем на 10 % номинального значения за одну секунду.

Из рис. 57а видно, что отношение короткого замыкания

$$OKЗ = kl/mn = i_{во}/i_{вк}.$$

Время разбега измеряется при пробном пуске совместно с приводным механизмом и представляет интерес для отстройки защиты от пусковых токов.

4.6.2. Проверка токовой отсечки. Проверку удобно вести с применением нагрузочного трансформатора, обеспечивающего подачу первичного тока порядка 500—1000 А в трансформаторы тока релейной защиты; с другого конца ТА их первичные выводы закорачиваются. Необходимо провести имитацию всех трех вариантов двухфазного КЗ с измерением вторичного тока и проверкой поведения реле. Отсечку ЭД мощностью до 400—500 кВт и напряжением 6—10 кВ можно проверить, подняв первичный ток до срабатывания реле. Если значение первичного тока срабатывания реле совпадает с заданным, вторичные токи можно не измерять. В том случае, когда мощность нагрузочного трансформатора недостаточна для срабатывания реле, можно ограничиться измерением вторичных токов в реле и убедиться в наличии вращающего момента в их подвижных системах. Вторичные токи должны соответствовать первичным с учетом коэффициента трансформации и схемы соединения ТА.

4.6.3. Продольная дифференциальная защита. Проверка производится током нагрузки от постороннего источника. Для обеспечения необходимого значения тока обмотки статора двигателя пофазно закорачиваются на выводах или на шинных сборках.

Поочередно имитируются внешние двухфазные короткие замыкания и измеряются вторичные токи в плечах ДЗ от каждой группы ТА и в реле защиты. Ток небаланса в реле не должен превышать 2—3 % тока в плечах защиты. В схеме ДЗ блока трансформатор — двигатель ток небаланса может быть значительно больше за счет разнотипности трансформаторов тока в плечах, но не должен превышать 10 % при токе нагрузки не менее 50 % номинального.

Имитируются двухфазные КЗ в зоне защиты. Значение первичного тока желательно доводить при этом до срабатывания реле, но при недостаточной мощности источника можно ограничиться проверкой вторичных токов и вращающего момента реле. Одновременно проверяется наличие тока в цепях защиты от перегрузки.

Удобно также проверять дифзащиту двигателей 6—10 кВ подачей симметричного трехфазного напряжения 0,4 кВ на выводы первичной обмотки трансформаторов тока со стороны выключателя ВН.

Дифференциальную защиту проверяют и под нагрузкой при пробном пуске ЭД. Отстройка реле ДЗ от пускового тока проверяется двух — трехкратным включением двигателя. Затем при нагрузке в цепях защиты не менее 25—30 % номинальной снимаются векторные диаграммы ДЗ и измеряется ток небаланса в реле.

С целью снижения тока небаланса при пусках двигателей и внешних КЗ рекомендуется уравнивать сопротивления проводов дифференциальной защиты. При имитации КЗ в зоне защиты реле должны срабатывать на отключение.

4.6.4. Пробный пуск электродвигателя. Перед пробным пуском двигателя защиты от междуфазных КЗ и однофазных замыканий на землю должны быть проверены, включены в работу и опробованы на отключение выключателя ЭД и АГП синхронного двигателя (если имеется). Измерив время разворота агрегата от момента включения выключателя до спада пускового тока ниже номинального значения тока статора, необходимо оценить надежность отстройки токовой защиты от времени пуска. В случаях, когда отстройка не обеспечивается, выдержку времени защиты от перегрузки следует увеличить.

Если перед пуском двигателя не была осуществлена проверка его дифзащиты в режиме внешнего КЗ, должна быть выполнена проверка под рабочим током ЭД. Для этого, не нарушая цепей защиты, снимают векторные диаграммы и измеряют значения вторичных токов, проходящих в обоих плечах защиты. Геометрическая сумма векторов этих токов должна быть равна нулю в каждой фазе.

Для получения достаточно четких результатов измерения следует производить при возможно большей токовой нагрузке ЭД. На синхронных двигателях это осуществляется достаточно просто путем увеличения тока возбуждения, но так, чтобы значение тока нагрузки не достигло уставки срабатывания реле, действующих на отключение.

У синхронных двигателей с АГП при пробном пуске проверяют время гашения поля, точнее, промежуток времени между моментом срабатывания промежуточного реле, действующего на отключение выключателя и АГП, и моментом, когда напряжение на статоре двигателя уменьшится до 30 % номинального. Значение тока возбуждения ЭД перед отключением должно соответствовать холостому ходу, а время гашения поля должно быть не более 8—10 с.

4.7. АПВ и АВР

4.7.1. Взаимодействие элементов схем с АПВ. Все схемы с АПВ имеют, помимо основных элементов (выключатели, реле защит и др. аппараты), также и режимные ключи, накладки и прочие коммутационные элементы. Следует проверить работу схем в целом и от каждого аппарата в отдельности, учитывая положения выключателя (включен или отключен, от защиты или вручную) и коммутационных элементов. Проверяются блокировки устройства и надежная работа схем при пониженном напряжении оперативного тока (80 % номинального).

Производится опробование устройства АПВ совместно с выключателями, причем имитируется успешное или неуспешное включение. Проверяется однократность или двукратность АПВ, работа всех блокировок, ускорение защиты до и после АПВ и т. д. Особое внимание надо обратить на проверку блокировки от многократных включений привода выключателя при двукратном АПВ, отсутствие ложных и обходных путей при работе АПВ. Следует тщательно проверить работу блок-контактов КГП — готовности привода к включению (пружина заведена), так как при ручном заводе они часто остаются в случайном положении.

Необходимо убедиться также, что при включении выключателя ключом управления или при снятии накладки АПВ не работает. Одновременно опробуется работа сигнализации: выпадение блинкеров, действие sireны и сигнальных ламп.

Измеряется время полного цикла АПВ от подачи импульса на отключение выключателя до повторного замыкания главных контактов выключателя. При необходимости производится осциллографирование процесса: записываются напряжения со стороны шин, линии, а также ток линии. По осциллограммам убеждаются, что включение выключателя устройством АПВ проходит нормально, без толчков тока и нарушения синхронизма.

4.7.2. Взаимодействие элементов схем с АВР. Проверку взаимодействия реле производят замыканием и размыканием контактов реле вручную, наблюдая при этом за работой схемы и сопоставляя ее с предусмотренной проектом.

Опробование схемы АВР производят при полностью собранной схеме вторичной коммутации путем имитации исчезновения напряжения. С этой целью отключают соответствующий трансформатор напряжения, желательно с первичной стороны (разъединителем), или со вторичной стороны посредством какого-либо временно устанавливаемого аппарата. Необходимо имитировать успешное и неуспешное АВР и, если имеется, ускорение до и после АВР.

Одновременно следует проверить однократность АВР и действие схемы на выключатели, отделители и пр. Необходимо проверить также работу всех блокировок путем включения и отключения аппаратов, контакты которых введены в соответствующие цепи АВР. Проверяется и работа сигнализации — выпадение блинкеров, действие звонка, сигнальных ламп.

Измеряется время действия АВР от момента подачи команды на замыкание контактов реле минимального напряжения до замыкания контактов резервного выключателя. Проверяется однократность отключения последнего (в случае неуставившегося КЗ) подачей импульса на отключение рабочего выключателя при закороченных контактах реле защиты. При необходимости осциллографируют напряжения и токи на рабочем и резервном вводах после искусственного отключения рабочего выключателя.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. 6-е изд. Разделы I, II, III, IV, V, VII. СПб.: ДЕАН, 2004.
2. Правила устройства электроустановок. 7-е изд. Разделы I, II, IV, VI, VII. СПб.: ДЕАН, 2004.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей. СПб.: ЦОТПБСП, 2003.
4. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. СПб.: ДЕАН, 2000.
5. Сборник правил и инструкций, применяемых при эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор. М.: АОЗТ «Энергосервис», 1995.
6. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок. СПб.: ДЕАН, 2001.
7. Объем и нормы испытаний электрооборудования / Под общ. ред. Б. А. Алексеева, Ф. Л. Когана, Л. Г. Мамиконянца. 6-е изд. М.: НЦ ЭНАС, 1998.
8. Сборник методических пособий по контролю состояния электрооборудования / АО «Фирма ОРГРЭС». Под ред. Ф. Л. Когана. М.: ЗАО «Энергосервис», 2001.
9. Техническое обслуживание релейной защиты и автоматики электростанций и электрических сетей / Под ред. Б. А. Алексеева. Ч. 1, 2, 3, 4. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000, 2001.
10. Применение и техническое обслуживание микропроцессорных устройств на электростанциях и в электросетях. Ч. 1, 2, 3, 4 / Под ред. Б. А. Алексеева. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001, 2002.
11. Техническое обслуживание измерительных трансформаторов тока и напряжения / Под ред. Б. А. Алексеева. М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.
12. Сборник правил и инструкций, применяемых при эксплуатации электроустановок потребителей / Госэнергонадзор. М.: АОЗТ «Энергосервис», 1995.
13. Справочник по наладке электрооборудования промышленных предприятий / Под ред. М. Г. Зименкова, Г. В. Розенберга, Е. М. Феськова. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.

14. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики / Е. И. Забокрицкий, Б. А. Холодовский, А. И. Митченко. 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1985.
15. Справочник по наладке электрооборудования электростанций и подстанций / Под ред. Э. С. Мусаэляна. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1984.
16. Справочник по наладке вторичных цепей электростанций и подстанций / Под ред. Э. С. Мусаэляна. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989.
17. Беркович М. А., Семенов В. А. Основы техники и эксплуатации релейной защиты. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1971.
18. Вишневецкий Л. М., Левин Л. Г. Я — электроналадчик. М.: Энергоатомиздат, 1987 (Б-ка электромонтера).
19. Электрическая часть станций и подстанций: Учебник для вузов / Под ред. А. А. Васильева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1990.
20. Чернобровов Н. В. Релейная защита: Учеб. пособие для техникумов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1971.
21. Гельфанд Я. С. Релейная защита распределительных сетей. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1987.
22. Кривенков В. В., Новелла В. Н. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. Учебное пособие для вузов. М.: Энергоиздат, 1981.
23. Постников Н. П., Рубашов Г. М. Электроснабжение промышленных предприятий: Учеб. для техникумов. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1989.
24. Основы метрологии и электрических измерений: Учебник для вузов / Под ред. Е. М. Душина. 6-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
25. Дракселл Р. Основы электроизмерительной техники: Пер. с нем. / Под ред. В. Ю. Кончаловского. М.: Энергоиздат, 1982.

Список основных сокращений

| | | |
|-------|---|--|
| АВР | — | автоматическое включение резерва |
| АКБ | — | аккумуляторная батарея |
| АПВ | — | автоматическое повторное включение |
| АЦП | — | аналого-цифровой преобразователь |
| БНТ | — | быстронасыщающийся трансформатор |
| БПН | — | блок напряжения питания |
| БПТ | — | токовый блок питания |
| БТН | — | бросок тока намагничивания |
| ВАХ | — | вольтамперная характеристика |
| ВЛ | — | воздушная линия |
| ВН | — | высшее (высокое) напряжение |
| ДЗ | — | дифференциальная защита |
| ДГК | — | дуговая катушка |
| ЗУ | — | запоминающее устройство |
| ИМС | — | интегральная микросхема |
| КБ | — | конденсаторная батарея |
| КЗ | — | короткое замыкание |
| КЛ | — | кабельная линия |
| КРУ | — | комплектное распределительное устройство |
| КТП | — | комплектная трансформаторная подстанция |
| ЛАТР | — | лабораторный автотрансформатор |
| ЛЭП | — | линия электропередачи |
| МДС | — | магнитодвижущая сила |
| МТЗ | — | максимальная токовая защита |
| НН | — | низшее (низкое) напряжение |
| ОЗУ | — | оперативное запоминающее устройство |
| ОКЗ | — | отношение короткого замыкания |
| ПЗУ | — | постоянное запоминающее устройство |
| ПНТ | — | промежуточный насыщающийся трансформатор |
| ПТЭЭП | — | правила технической эксплуатации электроустановок потребителей |

| | | |
|-----|---|--|
| ПУЭ | — | правила устройства электроустановок |
| РЗ | — | релейная защита |
| РЗА | — | релейная защита и автоматика |
| РПН | — | переключатель ответвлений трансформатора под нагрузкой |
| РУ | — | распределительное устройство |
| СИ | — | средства измерений |
| СН | — | среднее напряжение |
| ТА | — | трансформатор тока |
| ТКЗ | — | трехфазное короткое замыкание |
| ТНП | — | трансформатор тока нулевой последовательности |
| TV | — | трансформатор напряжения |
| ХХ | — | холостой ход |
| ЦАП | — | цифро-аналоговый преобразователь |
| ЭД | — | электродвигатель |
| ЭДС | — | электродвижущая сила |

Содержание

| | |
|--|----|
| Введение | 3 |
| Раздел 1. Силовые трансформаторы | 6 |
| Общие положения | 6 |
| 1. Измерение характеристик изоляции | 9 |
| 2. Испытание повышенным напряжением промышленной частоты | 17 |
| 3. Измерение сопротивления обмоток постоянному току | 18 |
| 4. Проверка коэффициента трансформации | 20 |
| 5. Проверка группы соединения трехфазных трансформаторов и полярности выводов однофазных трансформаторов | 21 |
| 6. Измерение тока и потерь холостого хода (XX) | 24 |
| 7. Проверка работы переключающего устройства и снятие круговой диаграммы | 27 |
| 8. Фазировка трансформаторов | 30 |
| 9. Испытание включением толчком на номинальное напряжение | 32 |
| 10. Включение трансформатора в работу | 33 |
| Раздел 2. Распределительные устройства | 34 |
| Основные понятия и определения | 34 |
| 1. Подготовительные работы при наладке распределительных устройств | 37 |
| 2. Испытание электрической изоляции | 38 |
| 3. Масляные выключатели (МВ) | 45 |
| 4. Воздушные выключатели (ВВ) | 61 |
| 5. Электромагнитные, элегазовые и вакуумные выключатели | 74 |

| | |
|--|------------|
| 6. Выключатели нагрузки (ВН) | 79 |
| 7. Разъединители, отделители и короткозамыкатели | 81 |
| 8. Реакторы | 83 |
| 9. Разрядники | 84 |
| 10. Измерительные трансформаторы напряжения (ТВ) (электромагнитные) | 88 |
| 11. Трансформаторы тока (ТА) | 95 |
| 12. Изоляторы | 106 |
| 13. Шины и токопроводы | 108 |
| 14. Силовые кабельные и воздушные линии электропередачи | 111 |
| 15. Конденсаторы | 124 |
| 16. Комплектные распределительные устройства внутренней и наружной установки (КРУ и КРУН) | 127 |
| | |
| Раздел 3. Устройства релейной защиты и автоматики | 136 |
| 1. Виды повреждений и ненормальных режимов | 140 |
| 1.1. Короткие замыкания | 140 |
| 1.2. Обрыв фаз | 144 |
| 1.3. Ненормальные режимы работы | 145 |
| 2. Виды защит | 150 |
| 2.1. Токовые и токовые направленные защиты | 150 |
| 2.2. Дистанционные защиты | 155 |
| 2.3. Дифференциальные защиты (ДЗ) | 158 |
| 2.4. Защита от замыканий на землю | 167 |
| 3. Защита отдельных видов электрооборудования | 175 |
| 3.1. Защита трансформаторов | 175 |
| 3.2. Защита электродвигателей | 189 |
| 3.3. Защита воздушных и кабельных линий электропередачи и шин | 193 |
| 4. Органы РЗ и их элементная база | 199 |
| 4.1. Электромеханические реле | 199 |
| 4.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит | 215 |
| 4.3. Полупроводниковая элементная база | 227 |
| 4.4. Статические реле | 242 |
| 4.5. Релейная защита на базе микропроцессорных устройств | 253 |

| | |
|---|-----|
| 4.6. Электроавтоматика | 260 |
| 4.7. Устройства автоматического включения резервного источника питания (АВР) | 271 |

**Раздел 4. Наладка устройств релейной защиты
и автоматики 285**

| | |
|---|-----|
| 1. Испытательная аппаратура | 285 |
| 1.1. Регулирование электрических параметров | 285 |
| 1.2. Испытание электрической изоляции переменным напряжением | 296 |
| 1.3. Комплектные переносные испытательные установки | 297 |
| 2. Электрические измерения | 307 |
| 2.1. Метрология. Погрешности | 307 |
| 2.2. Электроизмерительные приборы | 312 |
| 2.3. Техника измерений | 318 |
| 2.4. Организация измерений | 337 |
| 3. Проверка элементов РЗА | 341 |
| 3.1. Электромеханические реле | 341 |
| 3.2. Реле дифференциальных, направленных и фильтровых защит | 351 |
| 3.3. Статические реле | 358 |
| 3.4. Микропроцессорные устройства РЗА | 369 |
| 3.5. Устройства автоматики | 370 |
| 4. Комплексная проверка РЗА | 383 |
| 4.1. Общие испытания и проверка вторичной коммутации | 383 |
| 4.2. Токовые и токовые направленные защиты | 388 |
| 4.3. Дистанционная защита | 392 |
| 4.4. Дифференциальные защиты | 394 |
| 4.5. Защита силовых трансформаторов и автотрансформаторов | 397 |
| 4.6. Защита электродвигателей | 403 |
| 4.7. АПВ и АВР | 407 |

Литература 409

Список основных сокращений 411

Серия «Библиотека инженера»

Генрих Нейманович Дубинский
Лев Григорьевич Левин

НАЛАДКА УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЕМ СВЫШЕ 1000 ВОЛЬТ

Ответственный за выпуск

В. Митин

Макет и верстка

С. Тарасов

Обложка

Е. Холмский

ООО «СОЛОН-ПРЕСС»

123242, г. Москва, а/я 20

Телефоны:

(495) 254-44-10, (499) 252-36-96, (499) 252-25-21

E-mail: Solon-Avtor@coba.ru

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «АЛЪЯНС-КНИГА КТК»

Тел: (095) 258-91-94, 258-91-95

www.abook.ru

ООО «СОЛОН-ПРЕСС»

Формат 70×100/16. Объем 26 п. л. Тираж 1000

Отпечатано в ООО «Делия»

109107, г. Москва, ул. Марксистская, д. 9,

Заказ №