

А. И. Агафонов, Т. Ю. Бростилова, Н. Б. Джазовский

СОВРЕМЕННАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ



«Инфра-Инженерия»

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

A23

Р е ц е н з е н т ы:

доктор технических наук, профессор кафедры приборостроения
Пензенского государственного университета *Т. И. Мурашкина*;
кандидат технических наук, доцент, генеральный директор
ООО «НИИВТ-Русичи-Фарма» (г. Пенза) *А. Г. Пивкин*

Агафонов, А. И.

A23 Современная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем : учебное пособие / А. И. Агафонов, Т. Ю. Бростилова, Н. Б. Джазовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 300 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-0505-8

Рассмотрены основные принципы построения релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем; типовые схемы соединений трансформаторов тока; работа, оценка и область применения базовых схем релейной защиты и автоматики.

Для студентов электроэнергетических направлений подготовки, а также специалистов в области энергетики и электротехники.

УДК 621.316.925

ББК 31.27-05

ISBN 978-5-9729-0505-8 © Агафонов А. И., Бростилова Т. Ю., Джазовский Н. Б., 2020

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2020

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ

1

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

В электроэнергетических системах, на электрооборудовании электростанций, в распределительных сетях и на электроустановках потребителей электрической энергии могут возникать повреждения и ненормальные режимы [1–9].

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

При повышенном токе в проводниках выделяется большое количество тепла, вызывающее нарушения в месте повреждения и опасный нагрев неповрежденных линий и оборудования, по которым протекает ток.

Глубокое понижение напряжения нарушает нормальную работу потребителей электрической энергии и устойчивость работы генераторов и энергосистемы в целом.

Ненормальные режимы обычно приводят к отклонению напряжения, тока и частоты от допустимых значений. При понижении напряжения и частоты создается

1.1. Назначение релейной защиты и автоматики

1.2. Виды повреждений в электроустановках и основные причины их появления

1.3. Краткая характеристика влияния коротких замыканий на работу генераторов, трансформаторов и линий электропередач

1.4. Ненормальные режимы в электроустановках

1.5. Основные требования, предъявляемые к релейной защите и автоматике

опасность повреждения оборудования или нарушения устойчивости энергосистемы.

Таким образом, повреждения нарушают нормальную работу энергосистемы и потребителей электроэнергии, а ненормальные режимы создают условия возникновения повреждений или расстройства работы энергосистемы.

Для обеспечения нормальной работы энергосистемы и потребителей электроэнергии при возникновении повреждения необходимо быстрое выявление и отключение места повреждения от неповрежденной части электрической сети, что восстанавливает нормальные условия работы энергосистемы и потребителей электроэнергии.

Опасные последствия ненормальных режимов также можно предотвратить, если своевременно обнаружить отклонения от нормального режима [1–9] и принять меры к их устранению, например, снизить ток при его возрастании, повысить напряжение при его снижении.

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

Первоначально в качестве защитных устройств применялись плавкие предохранители. Однако по мере роста мощности и класса напряжения электрических установок и усложнения их схем соединений и распределения такой способ защиты сети стал неприемлемым, в силу чего были созданы защитные устройства, выполняемые с помощью специальных автоматов – реле, получивших название *релейной защиты*.

Релейная защита (РЗ) является основным видом электрической автоматики, без которой невозможна нормальная и надежная работа современных электроэнергетических систем.

При возникновении повреждений РЗ выявляет и отключает от системы поврежденный участок, воздействуя на специальные силовые выключатели, предназначенные для размыкания силовых цепей, находящихся под током повреждения.

Аналогично при возникновении ненормальных режимов РЗ выявляет их и в зависимости от характера нарушения режима произво-

дит операции, необходимые для восстановления нормального режима с выдачей сигнала дежурному персоналу.

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

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

1.2. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ И ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ

Большинство повреждений в электрических системах приводит к коротким замыканиям (КЗ) фаз между собой или на землю. На рис. 1.1, *а–в* приведены КЗ фаз для систем с изолированной нейтралью, а на рис. 1.1, *г–е* – для систем с глухозаземленной нейтралью.

В обмотках электрических машин и трансформаторов, кроме того, могут появляться межвитковые замыкания в обмотке одной фазы.

Основными причинами повреждений являются:

- нарушения изоляции токоведущих частей, вызванные ее старением, перенапряжениями, механическими повреждениями;
- повреждения проводов и опор ЛЭП, вызванные их неудовлетворительным состоянием, гололедом, ураганным ветром, вибрацией проводов;
- ошибки персонала при оперативных переключениях коммутационных аппаратов (разрыв тока разъединителем, подача напряжения на «закоротку» и т. д.).

Многие повреждения являются следствием конструктивных недостатков и несовершенства оборудования, некачественного его изготовления, дефектов монтажа и пусконаладочных работ, а также нарушения нормативных требований эксплуатации и сроков технического обслуживания.

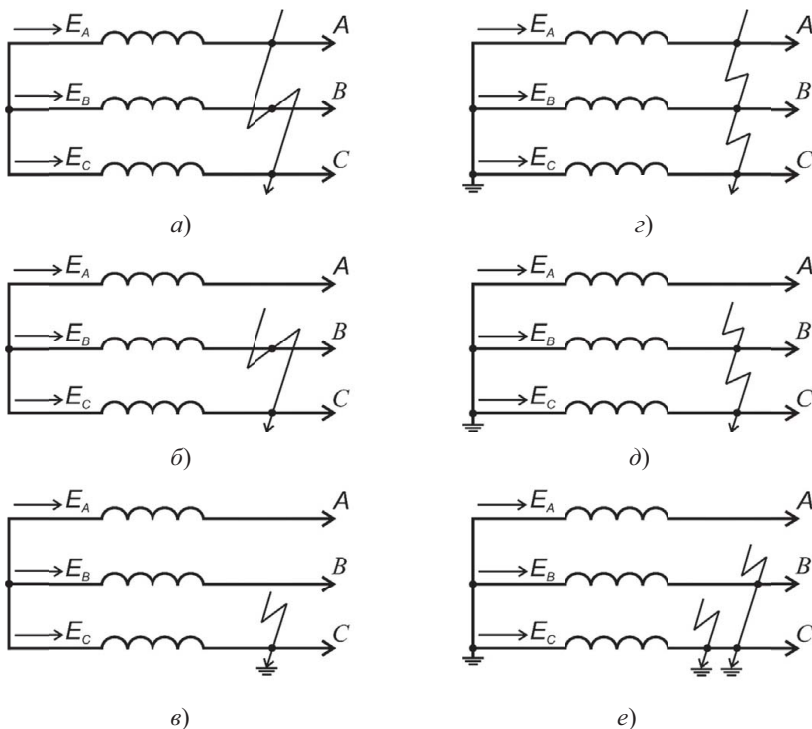


Рис. 1.1. Виды повреждений в электрических системах с изолированной (а, б, в) и глухозаземленной нейтралью (г, д, е)

1.3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРОВ, ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Короткие замыкания являются наиболее тяжелыми и опасными видами повреждений. При КЗ ЭДС (E) источника питания (генератора) прикладывается накоротко к минимальному сопротивлению R_k генераторов и линий (см. рис. 1.1, а-е). Поэтому в контуре замкнутой накоротко ЭДС фаз возникает большой ток ($I_{кз}$), называемый током короткого замыкания.

Короткие замыкания подразделяются на трехфазные, двухфазные и однофазные в зависимости от числа замкнувшихся фаз, замыкания в одной и более точках на землю [1–9].

При КЗ из-за больших токов возрастает падение напряжения в элементах системы, что приводит к понижению напряжения во всех точках сети от источника питания до места КЗ, так как согласно рис. 1.2.

$$U_m = E - I_{\text{кз}} Z_m.$$

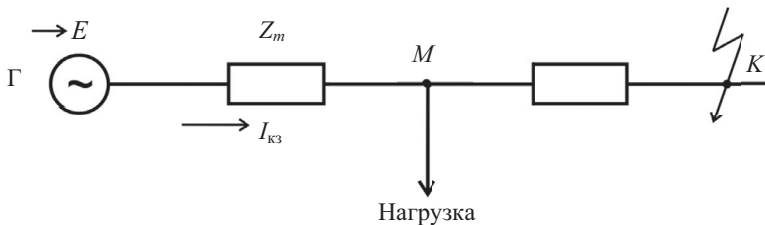


Рис. 1.2. Влияние понижения напряжения при КЗ

В результате КЗ увеличивается ток и происходит резкое падение напряжения у потребителя, которые приводят к ряду опасных последствий:

- ток КЗ согласно закону Джоуля – Ленца выделяет в активном сопротивлении R цепи в течение времени t тепло Q :

$$Q = k I_{\text{кз}}^2 R t;$$

- в месте повреждения это тепло и пламя электрической дуги производят большие разрушения, размеры которого тем больше, чем больше $I_{\text{кз}}$ и продолжительность КЗ (t). Проходя по неповрежденным оборудованностям и ЛЭП, ток КЗ нагревает их выше допустимых значений, что может вызвать повреждение изоляции оборудования и токоведущих частей;

- понижение напряжения при КЗ нарушает работу потребителей. Основными потребителями электрической энергии являются асинхронные двигатели, технологическое оборудование, АСУ, компьютерная техника, осветительное оборудование и т. д.;

- при протекании больших токов КЗ усиливаются *электродинамические взаимодействия* между проводниками, сопровождающиеся значительными механическими напряжениями;

– наиболее тяжелым последствием снижения напряжения при КЗ является нарушение устойчивости параллельной работы генераторов, что приводит к распаду энергосистемы и прекращению электроснабжения части или всех потребителей. В нормальном режиме механический момент вращения генератора уравнивается противодействующим моментом, создаваемым электрической нагрузкой генераторов, в результате чего скорость вращения всех турбогенераторов постоянна и равна синхронной.

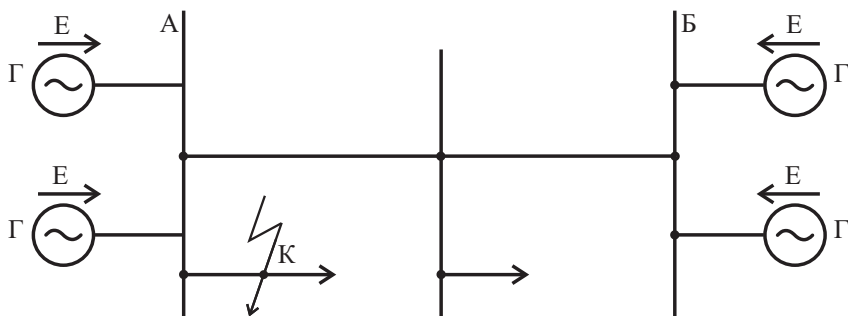


Рис. 1.3. Влияние снижения напряжения на работу генераторов

При КЗ в точке K у шин электростанции А (рис. 1.3) напряжение на шинах станет равным нулю, в результате чего *электрическая нагрузка*, а следовательно, и *противодействующий момент* генераторов также станет равным нулю. В то же время в турбину продолжает поступать прежнее количество *пара* (воды) и ее вращающийся момент остается неизменным, вследствие чего скорость вращения турбогенератора начинает быстро нарастать по причине значительной инерционности регулятора скорости турбины и по этой причине ускорение вращения турбогенераторов на станции А не предотвращается.

В иных условиях находятся генераторы станции Б. Они удалены от точки K , поэтому напряжения на их шинах могут быть близки к нормальному. Поэтому, если генераторы станции А разгружаются, то вся нагрузка системы переходит на генераторы станции Б, которая, перегружаясь, уменьшает их скорость вращения.

В результате КЗ скорость вращения генераторов станций А и Б становится резко различной, что и приводит к нарушению их син-

хронной работы. То же самое происходит при длительном КЗ при работе асинхронных двигателей. При понижении напряжения скорость вращения асинхронного двигателя уменьшается, в результате чего двигатель переходит в область неустойчивой работы и происходит его опрокидывание и полное торможение. С увеличением скольжения реактивная мощность, потребляемая асинхронным электродвигателем, растет, что может привести после отключения к дефициту реактивной мощности и, как следствие этого, к лавинообразному снижению напряжения во всей системе и прекращению ее работы.

Аварии с нарушением устойчивости электроэнергетической системы (ЭЭС) по величине ущерба являются самыми тяжелыми и требуют самого быстрого отключения.

Особым видом повреждения является замыкание на землю одной из фаз сети с изолированной нейтралью или заземленной через большое сопротивление дугогасящего реактора или большое активное сопротивление. Согласно рис. 1.1, в замыкание на землю в сети с изолированной нейтралью одной из фаз не вызывает КЗ. Возникающий при этом ток в месте повреждения замыкается через емкость проводов других фаз относительно земли и имеет поэтому небольшую величину, например, несколько десятков ампер. Линейное напряжение при этом виде повреждения остается неизменным, а работа потребителей и синхронный режим работы генераторов не нарушаются.

Однако этот вид повреждения создает ненормальный режим, вызывая перенапряжения и связанное с этим нарушение изоляции относительно земли двух неповрежденных фаз и переход однофазного замыкания на землю в многофазное КЗ.

1.4. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

К ненормальным режимам относятся режимы, связанные с отклонением от допустимых значений тока (I), напряжения (U) и частоты (f), опасные для оборудования или устойчивой работы энергосистемы.

Рассмотрим это подробнее.

1. *Перегрузка оборудования сети*, вызванная увеличением тока сверх номинального значения. Номинальным называется максималь-

ный по техническим условиям (ТУ) для данного оборудования ток в течение длительного времени. Если ток I , проходящий по оборудованию, превышает номинальное значение, то за счет выделенной им длительной теплоты температура токоведущих частей и изоляции через некоторое время превышает допустимые значения, что приводит к ускоренному старению изоляции и токоведущих частей. Для предупреждения повреждения оборудования при его перегрузке РЗ должна осуществить его разгрузку или отключение.

2. *Снижение частоты*, вызванное недостатком генерируемой мощности. Обычно возникает при отключении части работающих генераторов. При снижении частоты понижается производительность механизмов и нарушается технологический процесс тех агрегатов, для которых имеет значение постоянство скорости вращения электродвигателей.

Глубокое снижение частоты (ниже 47–45 Гц) ведет к тяжелым авариям с прекращением работы всей энергосистемы. Для исключения такой аварии необходимо восстановить баланс генерируемой и потребляемой энергии путем быстрого включения резервных генераторов или автоматического отключения части потребителей.

3. *Повышение напряжения* сверх допустимого значения. Может возникнуть на гидрогенераторах, а также на турбогенераторах большой мощности при внезапном отключении нагрузки или от сети. Для предотвращения повреждения оборудования предусматривается РЗ, которая должна снизить ток возбуждения или оперативно его отключить.

Опасное для изоляции оборудования повышение напряжения может возникать при одностороннем отключении или включении длинных ЛЭП высокого напряжения с большой емкостной проводимостью. Для ликвидации опасных перенапряжений в сетях сверхвысокого напряжения следует применять специальную автоматику.

4. *Качания напряжения*, возникающие при нарушении синхронной работы генераторов электростанций. В случае нарушения синхронизма появляется разность ЭДС генераторов подстанций, под действием которой появляется уравнительный ток. Возрастание уравнительного тока вызывает дополнительное нагревание оборудования, а уменьшение напряжения в системе нарушает работу потребителей. Качание является очень опасным ненормальным режимом, влияющим

на работу всей энергосистемы. По характеру изменения тока и напряжения качания похожи на КЗ, что в большинстве случаев приводит устройства РЗ в действие при качаниях. Такие хаотичные отключения разделяют энергосистему на отдельные участки с дефицитом или избытком генерируемой мощности, что может привести к частичному или полному нарушению электроснабжения потребителей. При проектировании РЗ для таких ЛЭП должны быть приняты меры, исключающие хаотичное действие при возникновении качаний.

1.5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ

К релейной защите от повреждений и ненормальных режимов предъявляются следующие основные требования: *селективность, быстродействие, надежность, чувствительность*.

– **Селективность.** Под селективностью, или избирательностью, понимается способность РЗ отключать при КЗ поврежденный участок сети.

На рис. 1.4 показаны примеры селективного отключения мест повреждения. Так, при КЗ в точке $K1$ защита должна отключать поврежденную линию выключателем В, т. е. выключателем, ближайшим к месту повреждения. При этом все потребители, кроме питавшихся от повреждения, остаются в работе.

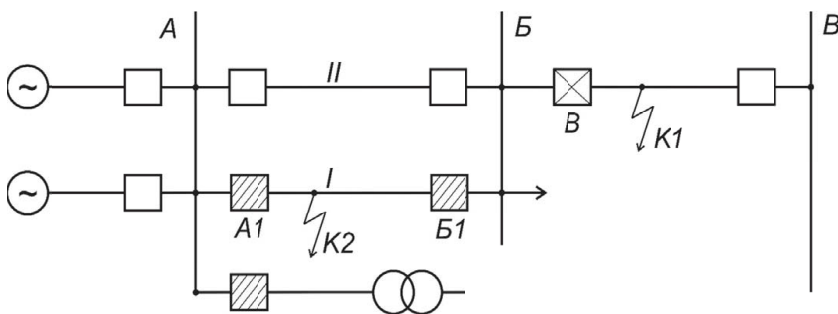


Рис. 1.4. Примеры селективного отключения мест повреждения

При КЗ в точке К2 при селективном действии защиты должна отключиться поврежденная линия I выключателями А1, а Б1 остается в рабочем состоянии. Поэтому, если подстанции А и Б связаны с сетью несколькими линиями, то селективное отключение КЗ на одной линии позволяет сохранить связь этой подстанции с сетью, обеспечивая тем самым бесперебойное питание потребителей. Таким образом, требование селективности является основным условием для обеспечения надежного питания потребителей.

– **Быстродействие.** Отключение КЗ должно производиться с возможно большей быстротой для ограничения размера разрушения оборудования, повышения эффективности действия автомата повторного включения, линий и сборных шин, сохранения устойчивости параллельной работы генераторов, электростанций, энергосистемы в целом. Условие параллельной работы генераторов, электростанций и энергосистемы в целом является главным.

Допустимое время отключения КЗ по условию сохранения устойчивости параллельной работы зависит от ряда факторов.

Важнейшим фактором является величина остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ на шинах электростанций и узловых подстанций энергосистемы. Чем меньше $U_{\text{ост}}$, тем быстрее должен отключаться участок КЗ. Наиболее тяжелыми по условию устойчивости являются трехфазные и двухфазные КЗ, КЗ на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью.

В современных энергосистемах для сохранения устойчивости требуется малое время отключения, например, в сетях 110–220 кВ – 0,15–0,3 с, а в сетях 330–500 кВ – 0,1–0,12 с. Правило устройства электроустановок (ПУЭ) рекомендует определять остаточное напряжение на шинах электростанций, и если оно меньше 60 % от номинального значения, то следует применять самое быстрое отключение [1]. При этом полное время отключения складывается из времени срабатывания релейной защиты $t_{\text{сз}}$ и времени отключения выключателя $t_{\text{в}}$, т. е.

$$t_{\text{откл}} = t_{\text{сз}} + t_{\text{в}}.$$

Обычно время срабатывания выключателя равно 0,15–0,06 с. Со временное быстродействие защит составляет 0,02–0,04 с.

Требование бысродействия является в ряде случаев определяющим условием, обеспечивающим устойчивость параллельной работы электростанций и энергосистем. Создание же селективных быстродействующих релейных защит является важной и ответственной задачей при их проектировании и отличается значительной сложностью и повышенной стоимостью.

Требование к времени действия защиты от ненормальных режимов зависит от их последствий. Часто они кратковременны и ликвидируются сами, например, перегрузка при пуске асинхронных двигателей. В таких случаях отключение надо делать с выдержкой времени. Продолжительность выдержки времени должна быть больше времени переходного процесса.

– **Чувствительность.** Под чувствительностью релейной защиты понимается ее способность реагировать на возможные повреждения при минимальных режимах работы системы электроснабжения, когда изменения действующей величины, например тока короткого замыкания и напряжения сети, минимальны, т.е. защита должна реагировать при отклонениях от нормального режима и обладать определенной чувствительностью, которая характеризуется коэффициентом чувствительности $K_{\text{ч}}$:

$$K_{\text{ч}} = \frac{I_{\text{кз мин}}}{I_{\text{сз}}}.$$

– **Надежность.** Требование надежности состоит в том, что защита должна безотказно работать при КЗ в пределах установленной для нее зоны и не должна работать в режимах, где ее работа не предусматривается.

Существенное значение для повышения надежности релейной защиты имеют правильная ее эксплуатация, систематический профконтроль ее технического состояния, организация тестового и функционального контроля.

В соответствии с ГОСТами под надежностью понимается способность изделия выполнять заданные функции с заданными параметрами. Надежность изделия характеризуется безотказностью, долговечностью, ремонтопригодностью и сохранностью.

Вопросы для самопроверки

1. Чем сопровождаются повреждения и ненормальные режимы?
2. Каково назначение РЗА?
3. Какие виды повреждений в электроустановках вы знаете?
4. Назовите основные причины появления повреждений.
5. Каково влияние КЗ на работу генераторов, трансформаторов ЛЭП?
6. Назовите основные требования, предъявляемые к РЗА.

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

2

2.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ

В схемах релейной защиты и электрической автоматики применяются электромеханические реле, реле на полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) и реле с использованием насыщающихся магнитных систем. Наибольшее распространение пока имеют электромеханические реле [6–9].

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

2.1. Общие принципы
выполнения реле

2.2. Электромеханические
реле

2.3. Современные
микропроцессорные
устройства

2.4. Особенности
эксплуатации
микропроцессорных защит
и автоматики

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

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

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

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

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

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

Принципы действия и устройство реле, предназначенных для отдельных защит – дифференциальных, дистанционных и др. – рассматриваются в главах, посвященных этим защитами.

2.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Элементы конструкции электромеханических реле

Электромеханические реле могут выполняться на электромагнитном, индукционном, электродинамическом, индукционно-динамическом и магнитоэлектрическом принципах. Отечественная промышленность изготавливает электромеханические реле в основном на электромагнитном и индукционном принципах, которые позволяют создать все требующиеся в эксплуатации разновидности реле.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
-------------------	---

ВВЕДЕНИЕ	4
----------------	---

1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ О РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ

1.1. НАЗНАЧЕНИЕ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ	5
--	---

1.2. ВИДЫ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ И ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ИХ ПОЯВЛЕНИЯ	7
--	---

1.3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЛИЯНИЯ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ НА РАБОТУ ГЕНЕРАТОРОВ, ТРАНСФОРМАТОРОВ И ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ	8
--	---

1.4. НЕНОРМАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ	11
--	----

1.5. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЕ И АВТОМАТИКЕ	13
---	----

<i>Вопросы для самопроверки</i>	<i>16</i>
---------------------------------------	-----------

2. ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СОВРЕМЕННОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ

2.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ РЕЛЕ	17
---	----

2.2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ РЕЛЕ	18
-------------------------------------	----

2.3. СОВРЕМЕННЫЕ МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ УСТРОЙСТВА	23
---	----

2.4. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ И АВТОМАТИКИ	47
---	----

<i>Вопросы для самоконтроля</i>	<i>63</i>
---------------------------------------	-----------

3. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

3.1. ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ И ИХ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ	64
--	----

3.2. ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОСТИ	65
---	----

3.3. ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ	66
---	----

3.4. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТОКА И РЕЛЕ ТОКА	67
---	----

3.5. СПОСОБЫ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ И ВОЗДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ НА ВЫКЛЮЧАТЕЛЬ НАГРУЗКИ	73
Вопросы для самопроверки.....	76

4. ИСТОЧНИКИ ОПЕРАТИВНОГО ТОКА

4.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ.....	77
4.2. ХАРАКТЕРИСТИКА И СХЕМЫ ПИТАНИЯ ОПЕРАТИВНЫХ ЦЕПЕЙ ИСТОЧНИКОВ ПОСТОЯННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА.....	78
4.3. ВИДЫ И ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКОВ ПЕРЕМЕННОГО ОПЕРАТИВНОГО ТОКА	81
4.4. ПИТАНИЕ ЦЕПЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ВЫКЛЮЧАТЕЛЯМИ.....	82
Вопросы для самопроверки.....	90

5. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА

5.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ТОКОВЫХ ЗАЩИТ	91
5.2. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЛЭП	93
5.3. СХЕМЫ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ НА ПОСТОЯННОМ ОПЕРАТИВНОМ ТОКЕ.....	95
5.4. ВЫБОР ТОКА СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТ	100
5.5. ВЫБОР СТУПЕНИ И ВРЕМЕНИ ДЕЙСТВИЯ ЗАЩИТЫ ВЫДЕРЖКИ... ..	105
5.6. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА С ПУСКОМ (БЛОКИРОВКОЙ) ОТ РЕЛЕ МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ	108
5.7. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ....	112
5.8. МАКСИМАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ ЗАЩИТЫ С РЕЛЕ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ	133
5.9. ОБЩАЯ ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ.....	134
Вопросы для самопроверки.....	134

6. ТОКОВЫЕ ОТСЕЧКИ

6.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ОТСЕЧЕК	135
6.2. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ ОТСЕЧЕК.....	136
6.3. ПАРАМЕТРЫ ТОКОВЫХ ОТСЕЧЕК МГНОВЕННОГО ДЕЙСТВИЯ	137
6.4. НЕСЕЛЕКТИВНЫЕ ОТСЕЧКИ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ	140

6.5. ТОКОВЫЕ ОТСЕЧКИ НА ЛИНИЯХ С ДВУСТОРОННИМ ПИТАНИЕМ.....	141
6.6. ТОКОВЫЕ ОТСЕЧКИ С ВЫДЕРЖКОЙ ВРЕМЕНИ.....	143
Вопросы для самопроверки	145

7. МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ НАПРАВЛЕННАЯ ЗАЩИТА

7.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ПАРАМЕТРЫ ЗАЩИТЫ.....	146
7.2. ТРЕБОВАНИЯ К ОРГАНАМ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ, ИХ УСТРОЙСТВО И СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ	151
7.3. СХЕМЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ОРГАНОВ НАПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТИ И ИХ РАЗНОВИДНОСТИ	163
7.4. ОЦЕНКА И ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТОКОВЫХ НАПРАВЛЕННЫХ ЗАЩИТ	166
Вопросы для самопроверки	167

8. ПРОДОЛЬНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ

8.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	168
8.2. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ	169
8.3. ОЦЕНКА ПРОДОЛЬНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ	174
Вопросы для самопроверки	175

9. ПОПЕРЕЧНЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ЗАЩИТЫ

9.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ВИДЫ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ.....	176
9.2. ТОКОВАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА	177
9.3. НАПРАВЛЕННАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТА	182
9.4. ВЫБОР УСТАВОК НАПРАВЛЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ, ВКЛЮЧЕННОЙ НА ФАЗНЫЕ ТОКИ..	191
9.5. ВЫБОР УСТАВОК ПОПЕРЕЧНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ НАПРАВЛЕННОЙ ЗАЩИТЫ НУЛЕВОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ.....	196
9.6. ОЦЕНКА НАПРАВЛЕННЫХ ПОПЕРЕЧНЫХ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ЗАЩИТ	196
Вопросы для самопроверки	197

10. ДИСТАНЦИОННАЯ ЗАЩИТА

10.1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	198
10.2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫДЕРЖКИ ВРЕМЕНИ ДИСТАНЦИОННЫХ ЗАЩИТ	201
10.3. ПРИНЦИПЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СЕЛЕКТИВНОЙ ЗАЩИТЫ СЕТИ С ПОМОЩЬЮ СТУПЕНЧАТОЙ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ.....	201
10.4. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ СО СТУПЕНЧАТОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ	203
10.5. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ И ПУСКОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ НА НАПРЯЖЕНИЕ И ТОК СЕТИ.....	207
10.6. ХАРАКТЕРИСТИКИ СРАБАТЫВАНИЯ РЕЛЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ИХ ИЗОБРАЖЕНИЕ НА КОМПЛЕКСНОЙ ПЛОСКОСТИ.....	215
10.7. ОЦЕНКА ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ	221
Вопросы для самопроверки.....	222

11. АВТОМАТИКА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

11.1. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ПОВТОРНОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ	223
11.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ВКЛЮЧЕНИЕ РЕЗЕРВНОГО ПИТАНИЯ И ОБОРУДОВАНИЯ	233
11.3. АВТОМАТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТНАЯ РАЗГРУЗКА	238
Вопросы для самопроверки.....	248

12. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИКА БАЗОВЫХ УСТАНОВОК ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

12.1. ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ И АВТОМАТИКИ.....	250
12.2. МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА ГЕНЕРАТОРОВ И БЛОКА ГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР	251
12.3. ИНТЕГРИРОВАННАЯ РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА И ПРОТИВОАВАРИЙНАЯ АВТОМАТИКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	256
12.4. ОСОБЕННОСТИ ЗАЩИТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ, ВКЛЮЧАЯ МИКРОПРОЦЕССОРНУЮ ЗАЩИТУ	261
Вопросы для самопроверки.....	288
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	290